

# **VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CASCARONES DE HORMIGÓN**

**MELISA RAMÍREZ SALDARRIAGA**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniera civil**

**Carlos Andrés Blandón**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA  
INGENIERÍA CIVIL  
ENVIGADO  
2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al profesor Carlos Andrés Blandón por su orientación y acompañamiento durante la realización de este proyecto. Quiero agradecer también a los Ingenieros Alberto Domingo y Francisco Pérez por sus importantes aportes y su gran colaboración en el desarrollo del trabajo de grado.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	10
1. PRELIMINARES .....	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.1.1 Contexto y caracterización del problema .....	11
1.1.2 Formulación del problema .....	12
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	13
1.2.1 Objetivo General.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos .....	13
1.3 MARCO DE REFERENCIA .....	14
1.3.1 Geometría .....	14
1.3.2 Distribución de esfuerzos .....	18
1.3.3 Análisis estructural .....	20
1.3.4 Métodos constructivos .....	20
1.3.5 Pérdida de popularidad.....	22
2. METODOLOGÍA.....	23
3. DESARROLLO DEL PROYECTO .....	25
3.1 TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS .....	25
3.1.1 Casos históricos .....	25
3.1.2 Casos recientes.....	37
3.1.3 Método viable .....	45
3.2 EVALUACIÓN TÉCNICA DE UNA ESTRUCTURA EN CASCARÓN.....	50

3.2.1	Definición geométrica y distribución de esfuerzos. ....	50
3.2.2	Norma Colombiana de Construcción sismo resistente NSR10 .....	52
3.2.3	Modelo SAP2000.....	53
3.2.4	Métodos aproximados .....	60
3.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA ESTRUCTURA EN CASCARÓN .....	65
3.3.1	Volúmenes y cantidades.....	65
3.3.2	.....	67
3.3.3	Rendimiento .....	67
3.3.4	Análisis de precio unitario APU.....	67
3.4	OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	69
3.4.1	Estructuras metálicas. ....	69
3.4.2	Cubierta en tejas de barro. ....	69
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
4.1	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS.....	70
4.2	EVALUACIÓN TÉCNICA.....	70
4.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	74
4.4	COMPARACIÓN DE LOS CASCARONES DE HORMIGÓN Y OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	75
4.4.1	Bodegas en estructuras metálicas.....	75
4.4.2	Viviendas unifamiliares con cubierta de barro.....	76
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....	77
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	78

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparación de métodos históricos.</i>	35
<i>Tabla 2. Comparación de métodos recientes</i>	45
<i>Tabla 3 Costo en Colombia del prototipo realizado en suiza.</i>	50
<i>Tabla 4. Datos de la columna y sus materiales</i>	58
<i>Tabla 5.combinación máxima carga axial/momento.</i>	59
<i>Tabla 6. Datos de refuerzos</i>	60
<i>Tabla 7. Datos del caso de estudio.</i>	63
<i>Tabla 8. Días necesarios para el cimbrado del proyecto.</i>	66
<i>Tabla 9. Rendimientos de la construcción del Oceanografic</i>	67
<i>Tabla 10. Rendimientos después de eliminar errores.</i>	67
<i>Tabla 11. APU caso de estudio, cascarón.</i>	67
<i>Tabla 12. APU caso de estudio, columna.</i>	68
<i>Tabla 13. APU caso de estudio, vigas de borde.</i>	68
<i>Tabla 14. APU caso de estudio, Costillas.</i>	68
<i>Tabla 15. Costos de estructura metálica suministrados por Doblamos</i>	69
<i>Tabla 16. Rangos de esfuerzos de caso de estudio en SAP 2000</i>	72
<i>Tabla 17. Resumen de comparación entre el cascarón hindú y el caso de estudio.</i>	74
<i>Tabla 18. Costos estructura metálica.</i>	75

## LISTA DE FIGURAS

<i>Ilustración 1. Domos contruidos con moldes inflables</i>	15
<i>Ilustración 2. Cascarón de hormigón con geometría cilíndrica.</i>	15
<i>Ilustración 3. Ejemplo de Conoide</i>	16
<i>Ilustración 4. Ejemplo de paraboloide elíptico e hiperbólico</i>	16
<i>Ilustración 5. Restaurante Los Manantiales Félix Candela.</i>	17
<i>Ilustración 6. Basílica de Brasilia de Oscar Niemeyer.</i>	17
<i>Ilustración 7. Distribución de esfuerzos en una estructura con geometría de hiperboloide hiperbólico.</i>	18
<i>Ilustración 8. Distribución de esfuerzos en una estructura en forma de paraboloide hiperbólico.</i>	19
<i>Ilustración 9. Distribución de esfuerzos a compresión y tracción de una estructura formada de la intersección de varios segmentos de un paraboloide hiperbólico.</i>	19
<i>Ilustración 10. Sistema de formaletas de obra estructural construida por Félix Candela.</i>	21
<i>Ilustración 11. Descripción de las partes de un Domo monolítico</i>	21
<i>Ilustración 12. Mercado de Algeciras en España.</i>	25
<i>Ilustración 13. Formaleta de la Iglesia La Consolata en Medellín, Colombia</i>	26
<i>Ilustración 14. Proceso constructivo Mercado de Algeciras.</i>	26
<i>Ilustración 15. Malla geodésica del planetario Carl Zeiss.</i>	27
<i>Ilustración 16. Estructura laminar por Nervi.</i>	29
<i>Ilustración 17. Pabellón de Rayos Cósmicos.</i>	30
<i>Ilustración 18. Sistema constructivo Ctesiphon.</i>	31
<i>Ilustración 19. Restaurante Los Manantiales Félix Candela.</i>	32
<i>Ilustración 20. Paraguas inverso – paraboloide hiperbólico.</i>	32
<i>Ilustración 21. Paraguas inverso Félix Candela.</i>	33
<i>Ilustración 22. Canódromo de Madrid.</i>	34
<i>Ilustración 23. Seminario Mayor de Medellín.</i>	34
<i>Ilustración 24. Fábrica de Licores de Antioquia</i>	36
<i>Ilustración 25. Proceso constructivo de la formaleta del Oceanográfico.</i>	38
<i>Ilustración 26. Restaurante Oceanográfico de Valencia A.</i>	39
<i>Ilustración 27. Restaurante Oceanográfico de Valencia B.</i>	40
<i>Ilustración 28. Diseño de Hilo.</i>	41
<i>Ilustración 29. Primera formaleta y lámina construida.</i>	41
<i>Ilustración 30. Proceso del ETH para la construcción de modelo para sistema de malla de cable y tela.</i>	42
<i>Ilustración 31. Concreto Canvas.</i>	43
<i>Ilustración 32. Refugio Canvas.</i>	44
<i>Ilustración 33. Comportamiento a tensión del concreto reforzado con fibras de acero vs el concreto reforzado convencionalmente.</i>	46
<i>Ilustración 34. Marco de madera del prototipo realizado en la ETH.</i>	47
<i>Ilustración 35. Resultado del software Karamba de la optimización de la curva.</i>	48
<i>Ilustración 36. Corte del geotextil para la construcción de la formaleta.</i>	49
<i>Ilustración 37. Paraboloide hiperbólico a partir de rectas generatrices.</i>	51
<i>Ilustración 38. Geometría de caso aplicado.</i>	52
<i>Ilustración 39. Definición de cascarones en SAP2000.</i>	53
<i>Ilustración 40. Exportación de geometría a SAP2000.</i>	53
<i>Ilustración 41. Modelo del caso aplicado en SAP2000.</i>	54
<i>Ilustración 42. Esfuerzos máximos en un cuarto del “paraguas”.</i>	55

<i>Ilustración 43. Esfuerzos mínimos en un cuarto del “paraguas”</i>	56
<i>Ilustración 44. Estructura deformada y deformación máxima.</i>	56
<i>Ilustración 45. Área transversal de la columna de apoyo.</i>	57
<i>Ilustración 46. Diagrama de fuerzas axiales en la columna</i>	58
<i>Ilustración 47. Diagrama de interacción y carga de la columna</i>	59
<i>Ilustración 48. Definición de esfuerzos en un paraboloide hiperbólico.</i>	62
<i>Ilustración 49. Parámetros de paraboloides hiperbólicos.</i>	71
<i>Ilustración 50. Unión de paraboloides hiperbólicos.</i>	71
<i>Ilustración 51. Ubicación de esfuerzos extremos.</i>	73

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se pretende evaluar el potencial técnico y económico de los cascarones de hormigón en la actualidad, analizando diferentes métodos constructivos utilizados anteriormente y en el presente. Incluye una introducción al sistema estructural, una recopilación histórica de los métodos constructivos, las razones que influyeron en la pérdida de popularidad en los años 70 de los cascarones, la evaluación técnica y económica de los mismos.

Entre los métodos estudiados se seleccionó uno y se definió viable por sus ventajas, luego se presenta un análisis de los aspectos técnicos y económicos que se deben tener en cuenta para la construcción de este tipo de estructuras con el método constructivo elegido.

Se analiza un cascarón de hormigón (caso de estudio) con el software SAP2000, esta estructura tiene dimensiones similares a La Fábrica de Licores de Antioquia, Se obtiene el diseño por medio de métodos aproximados y se realiza el presupuesto de este con un análisis de precio unitario por componentes de la estructura en el contexto colombiano.

Finalmente los cascarones de hormigón son comparados con otros sistemas estructurales en aplicaciones industriales y de viviendas unifamiliares en zonas rurales. Dicha comparación es principalmente económica.

Después de terminar el análisis se obtiene que este tipo de estructuras son viables en aplicaciones industriales para bodegas o plantas de áreas medianas o grandes, presentando ventajas económicas significativas con respecto a estructuras metálicas. Para las viviendas unifamiliares la otra alternativa es más económica y no se justifica cambiar el método tradicional por el propuesto.

**Palabras clave:** Cascarones de Hormigón, Viabilidad técnica, Viabilidad económica, Métodos constructivos.



## ABSTRACT

The aim of this Project is to evaluate concrete shallow vaults current economic and technical potential, by analyzing different constructive methods used in the past as well as nowadays. The project includes an introduction to the structural system, constructive methods historical review, the reasons that affected the popularity of the shell structures back in the 70's and their economic and technical evaluation.

It has been selected among the studied methods, one viable method regarding its advantages which are displayed through the economic and technical analysis that have to be considered in the construction of this kind of structures.

A concrete shell structure (case of study) is analyzed using the software SAP 20000 and approximate methods, this structure has similar dimensions to the one of the Fabrica de Licores de Antioquia. The budget is made from a unitary price analysis for each component of the structure in the Colombian context.

At last the shell structures were compared with other structural systems for the construction of industrial structures and housing projects in rural zones. This comparison is principally economic.

The propose system results viable in industrial applications of medium and large areas after finishing the realized analysis, it presents significant economic advantages comparing with a metallic structure. Otherwise for housing projects, the traditional system results to be more economic that the concrete shell structures.

**Key words:** Concrete shells, economic viability, technical viability, construction methods.

## INTRODUCCIÓN

Los cascarones de hormigón son estructuras laminares de concreto reforzado que permiten alcanzar grandes luces con poca cantidad de material. Estas tuvieron gran auge en décadas anteriores y en el mundo existen varias obras que destacan sus grandes ventajas. Sin embargo, en la década de los 70 por razones de costos y de dificultades en los métodos constructivos, los cascarones de hormigón se dejaron de construir.

Los principales factores que influyen en los costos de dichas estructuras son la mano de obra y la construcción de la obra falsa y la formaleta, esto se debe a que se requiere exactitud en la geometría durante el proceso constructivo y los cascarones poseen geometrías fuera de lo común.

Sin embargo, según la opinión de algunos profesionales e investigaciones recientes relacionadas con el tema, es posible que en la actualidad se pueda retomar este sistema estructural y aprovechar su eficiente desempeño. Además las actuales tendencias arquitectónicas son acordes a las geometrías planteadas para estas estructuras.

También nuevos desarrollos en la tecnología de los concretos permiten obtener buenos resultados de resistencia a tracción y a compresión, lo que genera una oportunidad para recuperar las estructuras de cascarones de hormigón como posible sistema estructural.

En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica de los métodos constructivos utilizados a lo largo de los años, con el fin de seleccionar un método viable desde la perspectiva técnica y económica. Una vez elegido el método se desarrolla el diseño estructural y el presupuesto para una estructura en cascarón de geometría definida. Finalmente se comparan los resultados obtenidos con otra estructura existente definida por un sistema estructural diferente. Según esto se analiza si se encuentra una oportunidad de utilizar los cascarones como una solución actual a necesidades constructivas de grandes y medianas luces en Colombia en aplicaciones industriales y de vivienda.

---

## 1. PRELIMINARES

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1.1 Contexto y caracterización del problema

En Colombia, al igual que en el resto de Latinoamérica, existe un déficit habitacional tanto a nivel urbano como rural en los estratos socioeconómicos bajos. En el censo general del 2005 se encontró un déficit de 36.21% con una necesidad total de 3.828.055 de viviendas (Departamento Nacional de Planeación, 2005). Recientemente se han ejecutado programas de gobierno que buscan reducir este problema en todo el territorio nacional utilizando diferentes tipologías habitacionales. Además de la necesidad en viviendas para uso residencial, también existe una gran necesidad de construcción de edificaciones con usos industriales, comerciales e infraestructura educativa y deportiva, en particular en zonas rurales y pequeñas urbes.

Los métodos constructivos más comunes en la construcción de edificaciones de uso residencial a nivel rural se basan en la utilización del concreto, ladrillos y roca tallada como materia prima. Por lo general una proporción significativa del costo asociado a este tipo de estructuras es la cubierta. En el caso de estructuras para uso comercial, bodegas e infraestructura educativa y deportiva es común el uso de amplios espacios abiertos donde la solución estructural más tradicional se basa en elementos de acero. Esta solución normalmente utilizada puede tener altos costos comparada con otras alternativas. Un estudio que compara una estructura de acero con una lámina de concreto obtiene como una de sus conclusiones que el costo de la estructura en concreto es entre un 10% y un 13,2% menor que el de la estructura en acero (Saliba Constantino, 2004).

Una alternativa para la construcción de cubiertas es la utilización de cascarones de concreto de bajo espesor contruidos con diferentes formas geométricas. Experiencias pasadas en aplicaciones industriales y residenciales demuestran que es posible lograr cubiertas livianas, eficientes, durables y de gran área de cobertura. Sin embargo, por diversos motivos que incluyeron el incremento de los costos de mano de obra y formaletería además de limitaciones arquitectónicas, esta alternativa dejó de ser popular en la década de los 70 en el siglo XX (H.Sheer, 2005).

Varios de los argumentos por los que el uso de cubiertas y estructuras tipo cascarón dejaron de utilizarse de forma tan difundida podrían no ser válidos en la actualidad dados los avances en los procesos constructivos, tecnología del hormigón y características del entorno nacional. Sin embargo, no existe un estudio reciente que permita conocer con exactitud las ventajas técnicas y económicas del uso de estructuras con cubiertas tipo cascarón en edificaciones de viviendas de un solo piso a nivel rural o en edificaciones industriales y comerciales de grandes áreas.

Por otro lado en la actualidad existe un gran desconocimiento acerca de los temas relacionados con los cascarones de hormigón. Se puede destacar que en los años de auge de estas estructuras era común encontrar cursos completos en los currículos de ingeniería civil dedicados al análisis y diseño las conchas de concreto, esto explica porque la mayor

parte de la literatura que se encuentra data de los años 1950 a 1960. Algunas metodologías actuales para el diseño de este tipo de estructuras se basan en el uso de programas con elementos finitos, sin embargo el procedimiento de modelación es complejo (Castro, 2013). Todos estos argumentos implican que el proceso de análisis, diseño y construcción sea más complicado que el de otros sistemas. Por ejemplo, Santiago Calatrava, reconocido arquitecto a nivel mundial, opina que el avance tecnológico ha sido alto y que es posible que los arquitectos, ingenieros y constructores simplemente no estén lo suficientemente familiarizados con esto, ni con el potencial que se tiene para hacer grandes estructuras (H.Sheer, 2005).

### **1.1.2 Formulación del problema**

Las estructuras tipo cascarón se dejaron de construir desde la década de los años 70 debido a los altos costos en los métodos constructivos utilizados en la época y a las limitaciones y cambios en las concepciones arquitectónicas. Además de lo anterior, su escaso uso en años recientes, también se debe al desconocimiento de los métodos de análisis y diseño disponibles en la actualidad aplicables a este tipo de estructuras.

Algunas evidencias en la ciudad construidas entre los años 1960 a 1970, unas pocas experiencias recientes y la discusión previa con ingenieros de la época indican que en el caso colombiano sería posible encontrar soluciones competitivas para el uso de cascarones en estructuras como bodegas y almacenes donde la estructura metálica no sea una opción viable o viviendas unifamiliares de un solo piso (posible uso en viviendas de interés social) en donde el costo de la tierra sea bajo.

Hoy en día es mínimo el conocimiento a nivel local acerca de las alternativas de métodos de diseño y de los procedimientos constructivos de cascarones. Existe la necesidad de realizar un estudio para conocer la viabilidad técnica y la competitividad económica de este sistema constructivo para aplicaciones actuales.

---

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar la viabilidad técnica y económica de la construcción de estructuras tipo cascarón como alternativa para cubiertas de grandes espacios y viviendas de un solo nivel en zonas rurales.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los métodos utilizados para la construcción de estructuras con cubiertas tipo cascarón en los años de auge y sus aspectos económicos.
- Revisar los métodos actuales utilizados a nivel mundial para la construcción de cascarones de hormigón que plantean una solución al problema.
- Evaluar técnicamente y económicamente alternativas de métodos para construcción de cascarones que tienen el potencial de ser competitivos para aplicaciones en viviendas unifamiliares de un solo piso o como cubiertas en edificaciones industriales y comerciales de grandes luces.

---

### 1.3 MARCO DE REFERENCIA

Los cascarones de hormigón son estructuras de concreto reforzado con pequeños espesores y grandes luces que siguen geometrías de doble curvatura tales como los paraboloides hiperbólicos y paraboloides elípticos. Dichas estructuras presentan principalmente tres ventajas.

1.- Eficiencia. Estas estructuras requieren pequeños espesores para soportar grandes luces.

2.- Ligereza. Se caracterizan por ser estructuras de poco peso debidos a la reducida cantidad de material empleado para su construcción.

3.- Economía por poca cantidad de acero. Se requiere una baja cantidad de refuerzo debido a que su geometría se presta para que los momentos a flexión generados se aproximen a cero y la estructura solo está sometida a esfuerzos compresión.

#### 1.3.1 Geometría

Las estructuras en cascarones de hormigón definen su comportamiento estructural con base en su geometría, esto se debe a que las formas de la estructura logran que los momentos y el cortante, sean prácticamente nulos y los esfuerzos dentro de la misma sean solo por trabajo a carga axial de tracción y compresión. De esta manera es posible obtener dimensiones requeridas de concreto pequeñas logrando estructuras de pared delgada. Estas geometrías por lo general son superficies de doble curvatura o cortes de conos y esferas comúnmente generados por líneas rectas.

Las geometrías que pueden adoptar los cascarones de hormigón son:

- Domos. Corresponden a semiesferas que se asemejan a los iglús glaciales (Ilustración 1). La mayor aplicación en la actualidad con este tipo de estructuras son los domos monolíticos patentados por David B.South. Un domo monolítico de concreto es considerado como un edificio resistente, su geometría le permite ser útil

en el momento de resistir eventos naturales tales como inundaciones, incendios, terremotos, huracanes o tornados.



Fuente: (Argos , 2013)

**Ilustración 1. Domos construidos con moldes inflables**

- Cáscaras y Bóvedas cilíndricas. Estructura que se forma a partir de un arco generatriz que es desplazado por un eje. Ya que las bóvedas se forman a partir de arcos únicamente soportan esfuerzos de compresión. (ver Ilustración 2)

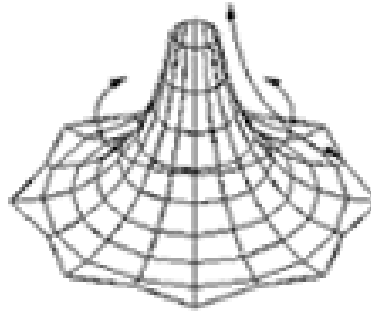


En: <http://www.iotdown.es/2011/11/los-hypars-de-felix-candela-i/>, 2015

**Ilustración 2. Cascarón de hormigón con geometría cilíndrica.**

- Conoides. Es una superficie alabeada, cuya línea recta generatriz se mueve de tal modo que este siempre contacto con dos líneas directrices, una recta y otra curva, y además que sea siempre paralela a un plano director (Wellman, 1987). Éste, como

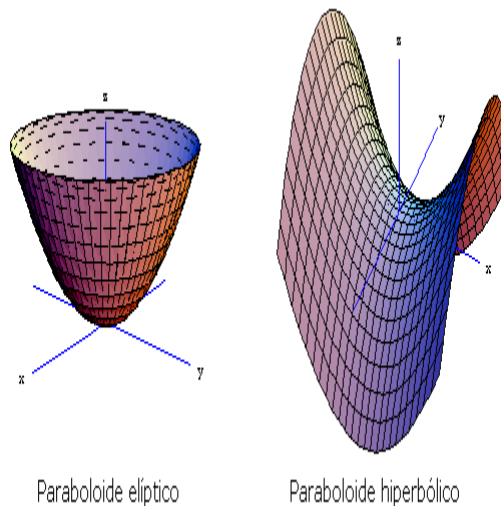
los hiperboloides y los paraboloides hiperbólicos, puede generarse a partir de líneas rectas. (ver Ilustración 3)



En: [www.sitea.com.uy](http://www.sitea.com.uy) , 2015

**Ilustración 3. Ejemplo de Conoide**

- Paraboloides elípticos. Es una superficie cuádrica que se forma al hacer girar una cónica alrededor de uno de los ejes de la resultante de seccionar un cono por un plano en distintas posiciones relativas (Izquierdo Álvarez , 1999). (ver Ilustración 4)



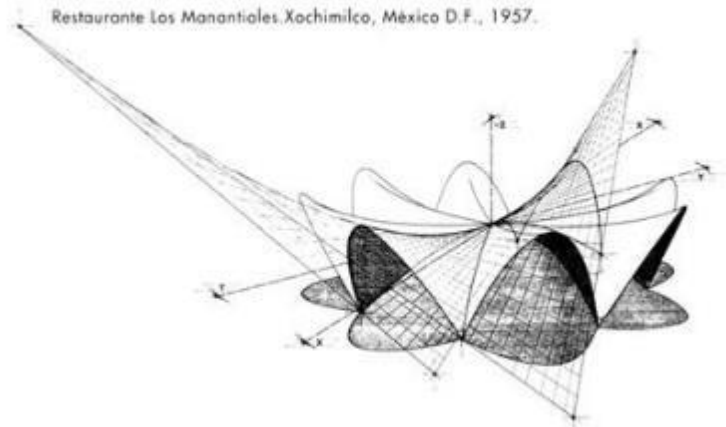
En: <http://www.frsn.utn.edu.ar/gie/superficies/paraboloides.html>

**Ilustración 4. Ejemplo de paraboloide elíptico e hiperbólico**

- Paraboloides hiperbólicos. Es una superficie formada por dos familias de rectas de dos planos diferentes con concavidad opuesta. Esta es la más utilizada en las estructuras existentes ya que la sencillez de su definición geométrica hace que su funcionamiento estructural sea más fácil de plantear y comprender, además, esta es una superficie de doble curvatura, las cuales si se sujetan adecuadamente,



pueden trabajar sólo como membranas, independientemente de las cargas aplicadas. (ver Ilustración 5)



Fuente: (Peerdeman, 2008)

**Ilustración 5. Restaurante Los Manantiales Félix Candela.**

- Hiperboloide hiperbólico. Esta es una superficie donde todas las generatrices son paralelas a un cono. (ver Ilustración 6)



En: <http://arquitecturaespectacular.blogspot.com/2010/04/catedral-de-brasilia.html>

**Ilustración 6. Basílica de Brasilia de Oscar Niemeyer.**

Además con cortes y combinaciones de estas geometrías se han construido estructuras laminares a través de la historia.

### 1.3.2 Distribución de esfuerzos

Estas estructuras, igual a las curvas catenarias, tienen una distribución de peso propio de manera uniforme y estructuralmente actúan como los arcos, los cuales solo están sometidos a esfuerzos axiales.

Generalmente los cascarones de hormigón no están sometidos a esfuerzos de flexión o de torsión debido a su geometría. Sin embargo, existen casos donde la estructura laminar tiene este tipo de esfuerzos en los extremos, para estos casos el espesor de la estructura debe ser mayor donde se encuentran este tipo de esfuerzos (Pérez J. , 2013).

A continuación se presentan algunos ejemplos de la forma como se distribuyen los esfuerzos en los cascarones:

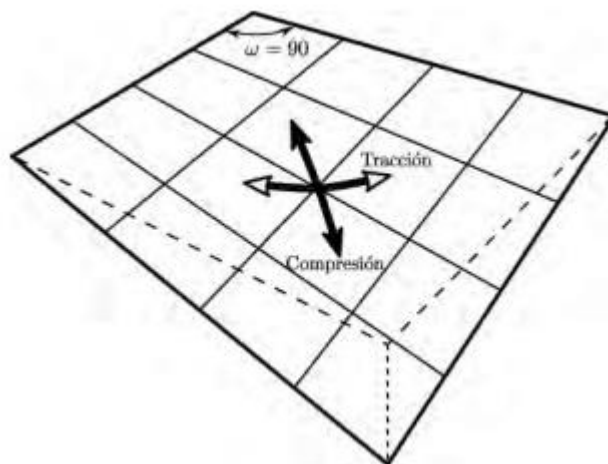
En los hiperboloides hiperbólicos los esfuerzos de tracción se presentan en la cúpula y la base y los esfuerzos a compresión se distribuyen tangentes a estos. Tal como se muestra en la Ilustración 7.



Fuente: (Gonzales )

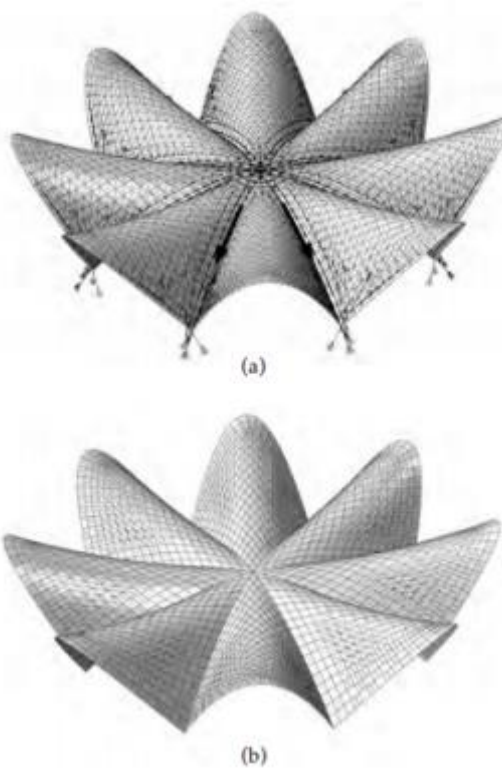
**Ilustración 7. Distribución de esfuerzos en una estructura con geometría de hiperboloide hiperbólico.**

En la Ilustración 8 se puede observar como los esfuerzos en un paraboloide hiperbólico son paralelos a los dos planos que forman la geometría. También se puede ver que la estructura soporta esfuerzos axiales de tracción y compresión, cada uno en un plano diferente.



Fuente: (Quecedo Olivia , 2010)

**Ilustración 8. Distribución de esfuerzos en una estructura en forma de paraboloides hiperbólicos.**



Fuente: (Quecedo Olivia , 2010)

**Ilustración 9. Distribución de esfuerzos a compresión y tracción de una estructura formada de la intersección de varios segmentos de un paraboloides hiperbólicos.**

La Ilustración 9 pertenece a la distribución de esfuerzos del restaurante Los Manantiales, obra reconocida del arquitecto Félix Candela, estructura diseñada a partir de la unión de varios cortes de un paraboloides hiperbólico, la geometría más usada por el arquitecto.

### 1.3.3 Análisis estructural

Los cascarones de hormigón son estructuras hiperestáticas. Para su análisis existen seis ecuaciones y diez incógnitas o fuerzas internas. Sin embargo, es posible resolver este tipo de estructuras por medio de métodos aproximados, suponiendo los momentos internos del cascarón como cero, sin dejar de obtener resultados razonables. Este método aproximado se le conoce como la teoría de las membranas y funciona debido a que en los cascarones de espesor delgado los momentos son despreciables y poseen pequeña rigidez a la flexión, es decir son estructuras incapaces de resistir este tipo de esfuerzo ya que son mínimos y no hay diferencias significativas.

Las membranas son estructuras que conforman una superficie en el espacio, con espesor mínimo. Dicho del modo más sencillo, las membranas son superficies materiales, los objetos que más se aproximan materialmente a una superficie geométrica.

Las membranas trabajan solo mediante esfuerzos en las direcciones tangentes a su superficie media. Estos esfuerzos, de compresión o tracción, son los esfuerzos de membrana. Esto se genera debido a que su curvatura permite un equilibrio entre dichas cargas y los esfuerzos de membrana (Vigilaloro, 2006).

Aunque los cascarones son estudiados como membranas que toman la forma geométrica de una curva debido a que su espesor es delgado con relación a su área superficial, no necesariamente son estructuras con espesores extremadamente delgados ni están conformadas por materiales elásticos. Es por esto que el uso del concreto es posible (HAAS, 1962).

Como otra posible herramienta para el análisis estructural de los cascarones de hormigón se encuentra los análisis por medio de elementos finitos con el uso de programas simuladores de estructuras como SAP 2000, estos programas cuentan con la opción de analizar estructuras de tipo membranas. Sin embargo la concepción de estas geometrías en este tipo de programas puede ser compleja (Castro, 2013).

### 1.3.4 Métodos constructivos

El método constructivo tradicional, usado por Félix Candela y sus precursores europeos consta de un sistema de encofrado formado por tablillas de madera que requiere de mucha mano de obra para su construcción debido a la complejidad de construcción. Esto se puede observar en la Ilustración 10 que ilustra el sistema de encofrado de una de las obras de Candela.

*Vista general de la estructura de andamios. El andamio alcanzó una altura de hasta 13,70 m.*



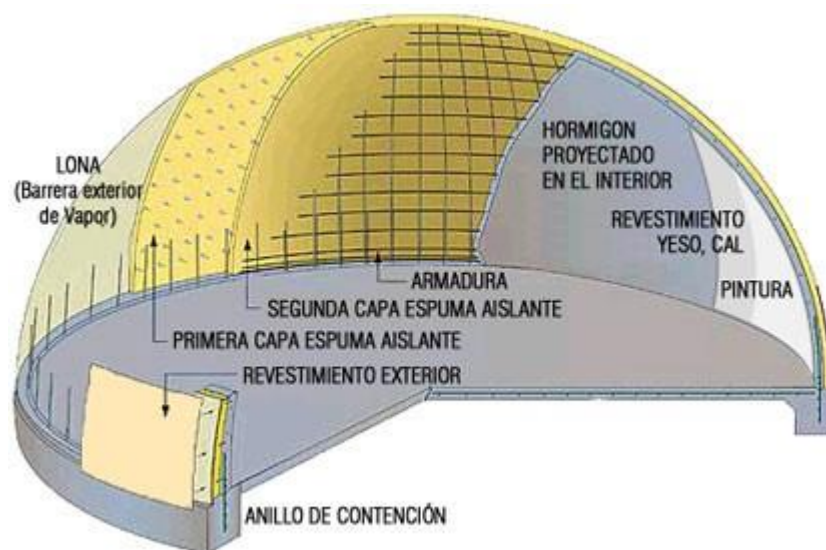
Fuente: (Gonzales )

**Ilustración 10. Sistema de formaletas de obra estructural construida por Félix Candela.**

En la actualidad existen otros métodos constructivos que buscan la reducción en los costos de construcción como el método de la tela inflada, el mortero o concreto lanzado entre otros. Dentro de estos métodos se pueden resaltar:

El método del concreto lanzado, que no requiere del uso de formaleta y consiste en lanzar concreto por medio de maquinaria especial a una capa delgada de concreto que sirve como apoyo o formaleta.

El método de los domos monolíticos que se puede observar en la Ilustración 11, sirve para la construcción de domos por medio de una tela que se infla, para lograr presiones que ayuden a soportar el concreto mientras se produce el proceso de fraguado y curado de este, es decir haciendo el papel de la formaleta.



Fuente: (Domes, 2008)

**Ilustración 11. Descripción de las partes de un Domo monolítico**

---

### **1.3.5 Pérdida de popularidad**

Dentro de los aspectos que se plantean como razones por las cuales estas estructuras perdieron popularidad entre ingenieros y arquitectos entre 1970 y 1980, se encuentran supuestas limitaciones en las formas arquitectónicas, el alto costo de la formaleta y de la mano de obra, además de la falta de atractivo que encuentran los arquitectos en este tipo de diseño en la actualidad (H.Sheer, 2005). El ingeniero Ricardo Bitella, notó cuando diseñó este tipo de estructuras que los arquitectos no podían ser tan libres a la hora de generar cambios en la geometría como en otro tipo de estructuras (H.Sheer, 2005).

Los aspectos que afectan significativamente el costo de los cascarones son la formaleta utilizada para su construcción y la mano de obra requerida. Aunque no se necesita una formaleta curvada en todos los casos, debido a las geometrías con las que se construyen los cascarones, sí se requiere de detalles especiales como el control de la inclinación para el correcto vaciado del concreto y el control del espesor para garantizar una distribución de esfuerzos adecuada. El hecho de tener que utilizar formaletas especiales para el vaciado del concreto y la mano de obra requerida para el manejo de estas, aumenta de manera significativa el costo de los cascarones de hormigón.

---

## 2. METODOLOGÍA

- ***Identificar los métodos utilizados para la construcción de estructuras con cubiertas tipo cascarón en los años de auge y sus aspectos económicos.***

Se recolectó información primaria y secundaria acerca de los métodos constructivos y los costos asociados a este tipo de estructuras en la época de auge (1920-1970). Para esto se realizó una revisión bibliográfica y adicionalmente se contó con la colaboración de ingenieros expertos en el tema como Alberto Domingo, Ingeniero civil quien participó en la construcción y diseño de L'Oceanografic de Valencia y actualmente trabaja como investigador en la Universidad Politécnica de Valencia. Además de ingenieros locales que participaron en la construcción de obras de este tipo en Medellín como La fábrica de Licores de Antioquia, El Cafetero y HomeCenter de las Vegas.

Se estudiaron los métodos constructivos utilizados en la época de auge, con sus ventajas y desventajas en forma comparativa, buscando una posible aplicación en la actualidad. Se hizo énfasis en los métodos de mayor acogida en el pasado y en aquellos de mayor éxito.

Con esta información recolectada se analizaron los principales factores que incidieron en el costo de estas estructuras incluyendo el de los materiales y los asociados al procedimiento constructivo.

- ***Revisar los métodos actuales utilizados a nivel mundial para la construcción de cascarones de hormigón que plantean una solución al problema.***

Se recolectó información secundaria incluyendo literatura, artículos de bases de datos, normas en los diferentes países de interés y patentes sobre los métodos constructivos de los cascarones de hormigón a nivel mundial. Sin embargo, también se obtuvo información primaria entrevistando a profesores españoles y colombianos que trabajan en el tema de los cascarones de hormigón en la actualidad, por medio de correos electrónicos, reuniones presenciales y vía Skype.

Se hizo un análisis comparativo entre los métodos estudiados destacando sus ventajas, desventajas y posibles geometrías de aplicación.

- ***Evaluar técnicamente y económicamente alternativas de métodos para construcción de cascarones que tienen el potencial de ser competitivos para aplicaciones en viviendas unifamiliares de un solo piso o como cubiertas en edificaciones industriales y comerciales de grandes luces.***

De los métodos planteados que han sido utilizados en el pasado para la construcción de cascarones de hormigón, se elige uno en base a sus ventajas, facilidad constructiva y a la opinión de los expertos en el tema en la actualidad.

Para el método seleccionado se definió un caso de estudio, una estructura, su geometría, se hizo el diseño estructural y finalmente se realizó un análisis económico con el fin de determinar la viabilidad de esta estructura en ambos aspectos en el contexto colombiano.

---

**Análisis técnico:**

Inicialmente se definió una geometría, a partir de cortes de paraboloides hiperbólicos que forman un “paraguas inverso”, utilizado comúnmente por Félix Candela. Se usaron dimensiones similares a las de las bodegas de La Fábrica de Licores de Antioquia.

Se analizaron aspectos importantes desde el punto de vista técnico, como la definición de geometría, el manejo de programas para el análisis y diseño de estructuras laminares, lo referente a estas estructuras en la NSR10, Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente y los métodos aproximados de análisis y diseño.

Se verificó el cumplimiento de los requisitos de la norma para el cascarón diseñado y para el método constructivo, se hizo el análisis estructural con un modelo en SAP 2000 y se diseñó la estructura por medio de un método aproximado considerando todos los supuestos y asegurando la estabilidad del cascarón.

El análisis de SAP se realizó con carga muerta y carga viva según la norma para un cuarto de la estructura real, el modelo se planteó a partir del corte de un prototipo del programa. El diseño se realizó por medio de métodos aproximado con base en ejemplos de cascarones hindús y con la ayuda del ingeniero Francisco Pérez.

**Análisis económico:**

Se obtuvo el costo de la construcción del cascarón con base en los precios actuales del sector de la construcción, los materiales requeridos para el método constructivo elegido como viable y la geometría definida para el caso de estudio. Los costos se obtuvieron de APU de empresas del sector y de proveedores en el país como Cemex y Sika.

El presupuesto se basa en un análisis de precio unitario en el que se incluyen los materiales, la herramienta menor y la mano de obra. Este análisis se hace para la estructura del cascarón; columna, cascarón, costillas y vigas de amarre, no incluye fachadas, mampostería ni piso. La herramienta menor se considera como el 5% de los materiales como recomendación de expertos en la construcción.

Se hizo una comparación con un sistema estructural metálico en el aspecto económico, los costos de la estructura metálica se obtuvieron con la compañía Doblamos S.A.



### 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

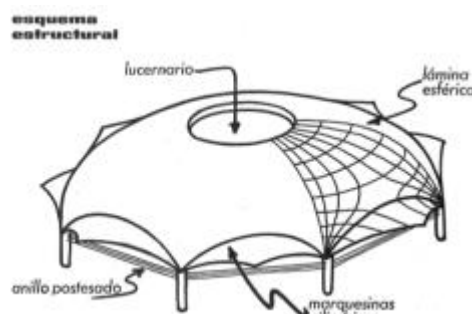
#### 3.1 TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

##### 3.1.1 Casos históricos

###### ○ Sistema de la formaleta completa y desechable

Es el método de mayor tradición a lo largo de la historia de las estructuras laminares, fue utilizado por varios ingenieros en la época de auge especialmente por el arquitecto Félix Candela. En Colombia gran parte de las estructuras en cascarón fueron construidas con formaletas completas de madera que se ajustaban a la geometría del diseño.

El reconocido ingeniero español, Eduardo Torroja, utilizó este método constructivo en la mayoría de sus obras. Además, hizo grandes aportes a la construcción y diseño de las estructuras laminares. La primera obra de Torroja fue El Mercado de Algeciras (Ilustración 12), membrana en concreto reforzado con forma ortogonal, una luz de 47,6 m y un espesor de 8 cm. Esta está apoyada en ocho pilares sometidos únicamente a cargas verticales y consta de unos anillos tensores que absorben todos los esfuerzos horizontales, en los cuales se basa el éxito de la estructura. Al finalizar la construcción del Mercado de Algeciras los anillos tensores se utilizaron para generar compresión en la estructura y levantarla, facilitando el proceso de retirar la formaleta para disminuir los impactos negativos en el cascarón (Moratilla & Godino, 2001).



Fuente: (Moratilla & Godino, 2001)

**Ilustración 12. Mercado de Algeciras en España.**

El método constructivo consiste en el uso de una formaleta rígida que sigue la forma de la curva requerida, dicha formaleta está constituida por tabloncillos de madera que se cortan de tal manera que se ajusten a la geometría. En el proceso de construcción se requiere de mano de obra intensiva y calificada y una gran cantidad de materiales.



Fuente: (Biblioteca Nacional de Colombia, s.f.)

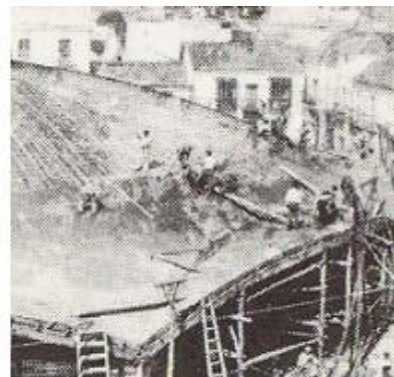
**Ilustración 13. Formaleta de la Iglesia La Consolata en Medellín, Colombia**

Aunque con esta técnica se puede desarrollar cualquier tipo de curva con un buen acabado, es costosa debido a la mano de obra y la formaleta requerida que solo puede ser utilizada una vez ya que solo se acopla a la geometría de la estructura a construir.

Las exigencias en la mano de obra se deben a los detalles que se requieren para la formaleta (ver Ilustración 14) gracias a la gran influencia que tienen las variaciones de la geometría en la resistencia de la lámina de concreto, un pequeño cambio puede generar altos esfuerzos de flexión que no son asumidos en el análisis y en el diseño. Eduardo Torroja disminuyó este problema retirando la formaleta como se menciona anteriormente, con esto logró que no se produjeran desplazamientos en el proceso de descimbrado.



*Construcción de las cimbras*



*Hormigonado de la cubierta*

Fuente: (Moratilla & Godino, 2001)

**Ilustración 14. Proceso constructivo Mercado de Algeciras.**

Según el ingeniero Mario Rodríguez, quien participó en la construcción del almacén El Cafetero y la Fábrica de Licores de Antioquia, “*el costo de estas estructuras es muy alto si*

*no se tiene una cierta repetición de la misma geometría en la estructura o una simetría en donde se pueda reutilizar la formaleta”.*

- **Mallas geodésicas**

El primer cascarón y domo de concreto reforzado fue construido con este sistema. En el año 1922 Walter Bauerfeld construyó “La Maravilla de Jena” en Alemania, una cúpula geodésica donde se ubica el planetario Carl Zeiss. El ingeniero de la compañía Carl Zeiss tenía interés en el proyecto, diseño la malla geodésica y uso el estudio de concreto reforzado de los alemanes Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalder (Peerdeman, 2008).

Las formas geodésicas resultan de la unión de estructuras de origen poliédrico, formadas mediante la subdivisión geométrica de un poliedro o porción de éste. El método diseñado por el alemán consiste en realizar una malla metálica que sigue esta geometría y funciona como obra falsa y refuerzo de la estructura laminar.

La malla metálica de este sistema es soportada por unos anillos que se arman en la base del domo. Además, dichos anillos resisten los esfuerzos a tensión que se crean en esta zona de la estructura, evitando la fisuración.

El planetario es un domo que fue construido por medio de la triangulación de una superficie metálica (Ilustración 15), dicha malla sirvió en el proceso constructivo como una auto cimbra para sostener la formaleta necesaria en el proceso de vaciado del concreto. Este se vació con el método Torket, para concretos proyectados.



Fuente: (Peerdeman, 2008)

**Ilustración 15. Malla geodésica del planetario Carl Zeiss.**

Este método elimina la necesidad de cimbra, lo cual se traduce en una reducción de costos, además, la malla geodésica que conforma el domo permite que la estructura posea una buena estabilidad.

---

- **Elementos prefabricados**

Entre los años 1930 Y 1940 Pier Luigi Nervi construyó varias estructuras laminares en Italia (Peerdeman, 2008). Debido a su insatisfacción con el encofrado de madera utilizado en la época y el vaciado in situ, hace grandes aportes en este tipo de estructuras y estos se convierten en su propia marca.

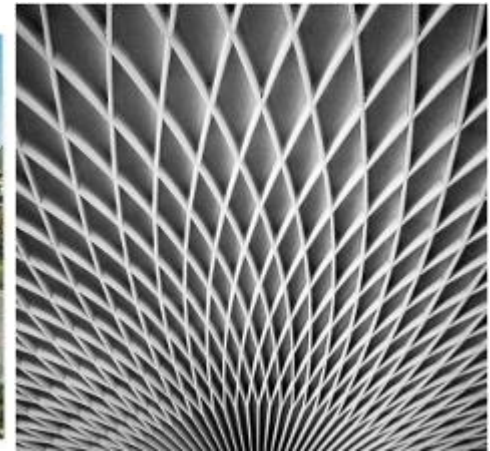
Su primer aporte es la aplicación de costillas para aumentar la rigidez de las cubiertas, esto consiste en aumentar el espesor del cascarón en algunas partes claves, los aumentos en el espesor funcionan como vigas de amarre. Además de esto Nervi fue pionero en la idea de remplazar el concreto vaciado como método constructivo para las estructuras laminares por elementos prefabricados, solo implementando el vaciado del concreto en las partes de mayores esfuerzos y en los nodos.

El uso de elementos prefabricados se percibe como un sistema constructivo en el que la armadura estructural se descompone en elementos ligeros y repetitivos que se construyen cerca de la obra y se instalan sobre unas cimbras parciales realizadas de acuerdo con una secuencia constructiva programada racionalmente.

Otro aporte importante de Nervi es el ferrocemento, este es un concreto armado que posee una mayor proporción de hierro en espesores finos que permite una mejor distribución de los esfuerzos y un aumento en los rendimientos mecánicos (Peerdeman, 2008). El ferrocemento es un material resistente y liviano lo cual es ideal para las estructuras laminares.

Nervi fue reconocido por sus Hangares, estructuras de cascarón conformadas con láminas de hormigón armado. En los años 20 construyó los hangares de Orvieto en Italia (Cassinello, Schlaich, & Torroja, 2010), sus estructuras más reconocidas. El ingeniero tenía su propio sello y sus obras se reconocen fácilmente, estas se basaron en pocas geometrías, cúpulas esféricas y bóvedas de directriz parabólica (Ver Ilustración 16), tienen una superficie perceptible y en el interior se pueden observar líneas cruzándose formando espirales.

*“El hormigón armado es el sistema constructivo más hermoso que la humanidad ha sabido encontrar hasta hoy. El hecho de poder crear piedras fundidas, de cualquier forma, superiores a las naturales porque son capaces de soportar tensiones, tiene en si algo de mágico. [...] La propiedad más característica de las estructuras de hormigón armado es que son monolíticas y por lo tanto ofrecen las más brillantes y específicas soluciones estáticas.”*  
(Derman, Grande, & Mangiantini, 2012)



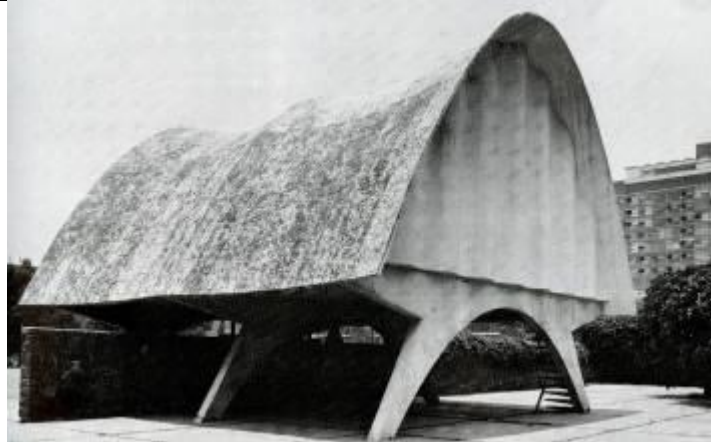
Fuente: (Derman, Grande, & Mangiantini, 2012)

**Ilustración 16. Estructura laminar por Nervi.**

- **Sistema Ctesiphon**

Sistema desarrollado por el ingeniero inglés Warren Waller durante la segunda guerra mundial para la construcción de cascarones de hormigón (Veenendaal & Block, 2014). Hoy en día existe una gran cantidad de estructuras que fueron construidas por este método, que en su época fue innovador y redujo notablemente los costos en la construcción.

Este método constructivo fue utilizado por Félix Candela en su primera estructura laminar, en San Bartolo, México, además lo volvió a utilizar para la construcción de una escuela rural, Tamaulipas en 1951 y El Pabellón de Rayos Cósmicos (Ilustración 17) (Cassinello, Schlaich, & Torroja, 2010)



Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 17. Pabellón de Rayos Cósmicos.**

Además, en España fue implementado como solución a la necesidad de viviendas de carácter social en una época que no se contaba con tecnologías avanzadas en el país y se necesitaban soluciones económicas y rápidas (Rabasco, 2010).

El método consiste en un sistema de formaleas reutilizables de acero o de madera en forma de curvas catenarias que se ponen en paralelo, sobre estas se pone una arpillera (tejido delgado comúnmente de estopa) pretensada y se vacía el concreto en estas telas, este por su propio peso se deforma y se hunde entre los arcos de la formalea generando una especie de ondulación. Lo marcado que se vean las ondulaciones depende principalmente de la separación entre los arcos y el pre esfuerzo que se le genere a la tela (Veenendaal & Block, 2014).





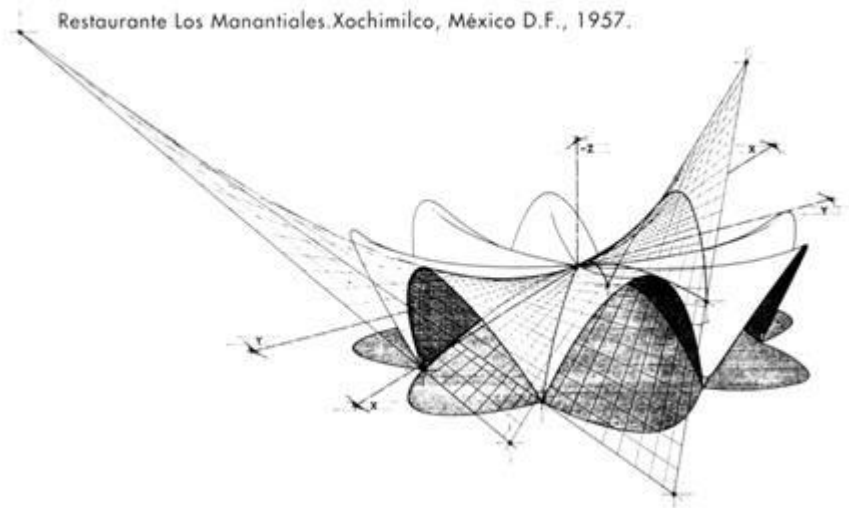
Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 18. Sistema constructivo Ctesiphon.**

La geometría que se obtiene utilizando este método permite que la estructura solo se encuentre sometida a esfuerzos de compresión, debido a esto no se requiere refuerzo de acero, funcionan exactamente igual que los arcos romanos debido a que las curvas catenarias que se forman.

- **Paraboloides hiperbólicos**

La tendencia de construir estructuras laminares en forma de paraboloides hiperbólicos es conocida por el español Félix Candela. El arquitecto diseñó la mayoría de sus obras con esta geometría debido a la facilidad constructiva que tienen y la buena adaptación al estado de membrana que tienen con respecto a otras curvas, especialmente las que no son de doble curvatura.

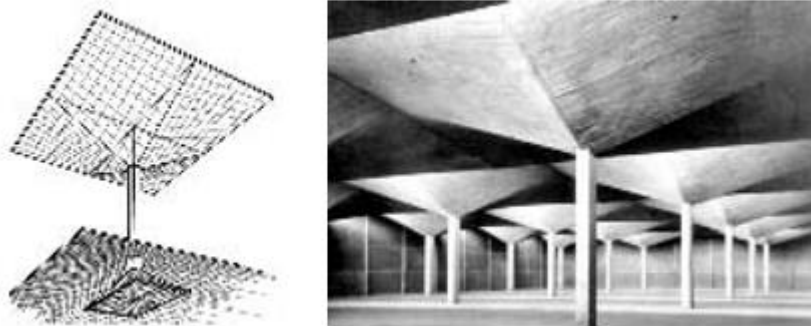


Fuente: (Peerdeman, 2008)

**Ilustración 19. Restaurante Los Manantiales Félix Candela.**

Los paraboloides hiperbólicos son curvas que están formadas por líneas rectas, al utilizar este método la formaleta está conformada por tablas de madera a las cuales se les cambia el ángulo para formar la curva.

Con una porción de la doble curvatura, el paraboloide hiperbólico, Candela experimentó la geometría del paraguas inverso, la cual resultó ser, económica, resistente y atractiva. Este tipo de estructuras fueron comúnmente utilizadas en la época en estructuras industriales, almacenes, entre otras.



Fuente: (Cassinello, Schlaich, & Torroja, 2010)

**Ilustración 20. Paraguas inverso – paraboloide hiperbólico.**





Fuente: (Cassinello, Schlaich, & Torroja, 2010)

**Ilustración 21. Paraguas inverso Félix Candela.**

Debido a que la formaleta se conforma por tablillas rectas de madera, esta se puede reutilizar o construir por módulos para una misma estructura y así reducir los costos. Además de reducir los costos esta geometría permite una distribución de los esfuerzos que facilita el análisis y el diseño de la lámina.

- **Estructuras plegadas**

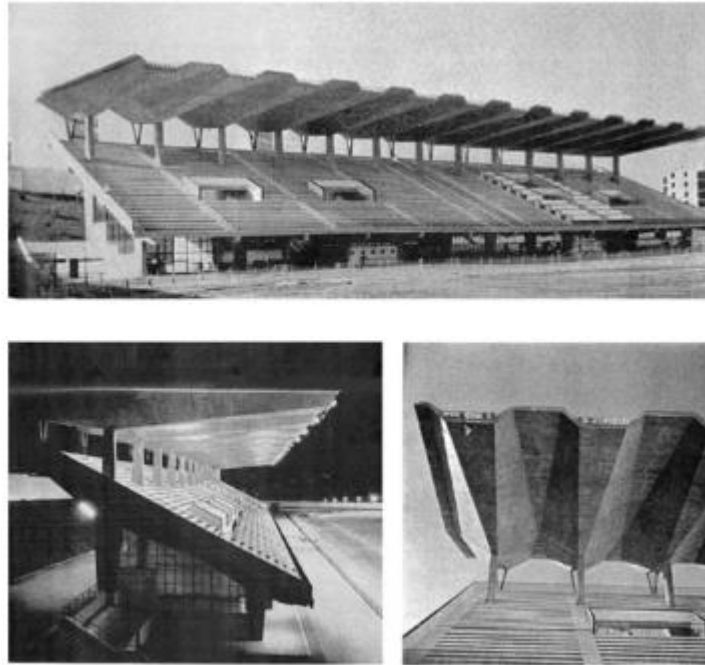
Las estructuras plegadas tuvieron su auge y fueron construidas durante dos décadas, entre los años 50 y los años 70 del siglo XX. Estas debido a su alta rigidez fueron utilizadas principalmente en voladizos de grandes luces.

Dentro de las estructuras plegadas más reconocidas está la sala de conferencias de la UNESCO en París construida por Nervi, Breuer y Zehrfuss y el hangar de Alleghany Airlines en el aeropuerto de Boston que tiene una luz de 75,86 m (García, 2007). En Medellín se encuentra el Seminario mayor (ver Ilustración 23)

---

*“Las láminas plegadas, definidas por planos que se cortan, ofrecen indudables posibilidades de aplicación al ser capaces de dar un gran canto, pese a su poco espesor, y una gran rigidez transversal, gracias a su forma». Está también entre sus ventajas el hecho de que: «la dificultad de encofrar superficies de simple o doble curvatura se elimina con la solución de láminas plegadas. Y así, como superficies poliédricas inscritas en bóvedas o cúpulas pueden resolver gran número de estructuras de este tipo” (García, 2007)*

---



Fuente: (García, 2007)

**Ilustración 22. Canódromo de Madrid.**



Tomada por: Daniel Calderón.

**Ilustración 23. Seminario Mayor de Medellín.**

En la Tabla 1 se resumen los métodos históricos que se desarrollaron en la época de auge para la construcción de los cascarones de hormigón con el fin de facilitar la comparación y observar de manera clara las ventajas y desventajas de cada uno.

**Tabla 1. Comparación de métodos históricos.**

<b>Método</b>	<b>Tipo de cascarón de hormigón (geometría)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Sistema de la formaleta completa y desechable.</b>	Todos los tipos de cascarones de hormigón.	Se pueden construir estructuras con una gran diversidad de geometrías.	Es costoso y requiere de mano de obra calificada.	La Consolata.
			La formaleta no es reutilizable.	
<b>Mallas geodésicas</b>	Domos o cúpulas.	La estructura geodésica sirve como refuerzo, como cimbra y como parte de la formaleta.	Restringen la geometría.	Planetario de ZEUSS
			La superficie de la cubierta no queda completamente lisa	
<b>Sistema Ctesiphon</b>	Catenarias inversas	No necesita refuerzo de acero y solo está sometido a cargas de compresión		Pabellón de los rayos cósmicos
<b>Paraboloides hiperbólicos</b>	Paraboloides hiperbólicos	Formaleta reutilizable.	Para que sea económica se requiere que el área a construir sea extensa	Restaurante Los Manantiales en México.
		Geometría basada en rectas.		Fábrica de Licores de Antioquia.
<b>Prefabricados</b>		Le da ligereza a la estructura.	Transporte e izaje.	Techos de viviendas populares en Bogotá en los años 70's
		No se necesita formaleta		
<b>Estructuras plegadas</b>		Por su alta rigidez son resistentes a cargas de vientos y sismos.	No es completamente atractivo para los arquitectos.	Seminario Mayor de Medellín
			Se requieren muchos detalles en las uniones para que no funcione cada lámina independiente o se presenten altos esfuerzos de flexión.	
		Está formada por planos, lo que se traduce en una mayor facilidad con respecto a la formaletería.	Se tiene poca experiencia relacionada con este tipo de estructuras.	
			Restricciones geométricas.	

○ **Caso Fábrica de Licores de Antioquia.**

Se entrevistó al Ingeniero Mario Rodríguez, quien participó en la construcción de dos cascarones de hormigón en la ciudad de Medellín, El Cafetero y La Fábrica de Licores de Antioquia.

La Fábrica de Licores de Antioquia es una estructura laminar formada por la unión de “sombrillas inversas” construidas a partir de secciones de un paraboloide hiperbólico (ver Ilustración 24). “Esta fue una estructura económica ya que se requirió muy poco material y se siguió un parámetro repitiendo varias veces la misma estructura, guardando una simetría y dejando la posibilidad de reusar la formaleta”.

Se usaron formaletas formadas por tablonces rectos de madera que se sostenía por medio de gatos y se trasladaba con andamios. Primero se vació la fundación de la estructura y la columna central de cada paraboloide, después se usó una malla de refuerzo delgado y junto para que el concreto no se “rodara”, luego se vació el concreto dejando unas “costillas” o vigas de amarre en el centro, en forma de cruz que se pueden ver al exterior del cascarón, finalmente fue importante impermeabilizar con un manto asfáltico recubierto de aluminio. Las “sombrillas” se unieron por medio de pernos metálicos, como eran muy flexibles no se necesitaba mayor esfuerzo para que estas se acomodaran.

Como aspecto relevante durante la entrevista se resaltó la importancia del curado en estas estructuras ya que tienden a aparecer fisuras fácilmente por refracción. En el caso de La Fábrica de Licores se tenía personal pendiente de que la estructura permaneciera húmeda y se utilizaron plásticos para forrarla.

Se evidenció que el método constructivo para las estructuras laminares en Colombia durante la época de auge consistía en una formaleta completa desechable, excepto en las estructuras que seguían una geometría de paraboloide.

Para el ingeniero la geometría más eficiente y simple es la de los paraboloides hiperbólicos, de lo contrario al usar otras geometrías los costos en mano de obra tendrían altos costos debido a la mano de obra requerida para la formaleta ya que se deben cortar las curvas en la madera y llenar las estructura de tablillas precisamente cortadas. Además de que esta formaleta se pierde.



Tomada por: Carlos Andrés Blandón.

**Ilustración 24. Fábrica de Licores de Antioquia**

### 3.1.2 Casos recientes

- **Concreto reforzado con fibra de acero**

La aparición de las fibras como refuerzo en los procesos constructivos se encuentra muchos años atrás, cuando se utilizaba pasto, fique, junco y pelos de animal para evitar la fisuración y mejorar la ductilidad del material. Sin embargo, los avances en la tecnología han permitido desarrollar diferentes materiales que mejoran las propiedades del concreto.

Desde la década de los 40 se han usado las fibras de acero en diferentes aplicaciones con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Almerich, 2010). En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones en todo el mundo acerca del comportamiento del material compuesto en diferentes proporciones.

Investigación realizada en el año 2004 en la Universidad Politécnica de Valencia en España, establece el modelo de comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras, lleva a cabo los ensayos pertinentes en laboratorio y se aplica a la construcción de un cascarón de hormigón por primera vez.

Dentro de las mejoras en los métodos constructivos se propone cambiar el material con el que se construyen las estructuras laminares y eliminar la malla de refuerzo, adicionando fibras de acero al concreto. Estudios realizados en España por el Ingeniero Alberto Domingo muestran resultados positivos con respecto al comportamiento mecánico de este material compuesto.

El Ingeniero Alberto Domingo utilizó diferentes proporciones de acero para determinar el comportamiento del material compuesto, 50, 70 y 90 kg/m<sup>3</sup> (Lázaro & Domingo, 2004) obteniendo las curvas esfuerzo deformación, se encontró que a medida que aumentaba la proporción de acero aumentaba la resistencia del material. No obstante, el Ingeniero considera que con la proporción de 50 kg/m<sup>3</sup> se obtienen los resultados esperados y una buena relación costo beneficio.

Las estructuras laminares de pequeños espesores requieren una importante resistencia a la flexo-tracción, ductilidad y resistencia a la fisuración, esto hace que el uso de las fibras sea una solución actual y viable para la construcción de estas estructuras.

Ensayos demostraron que este material tiene un mejor rendimiento y comportamiento cuando se desarrolla como concreto proyectado. Este método de concreto proyectado ha sido muy utilizado para la construcción de estructuras en cascarones de hormigón con buenos resultados (Lázaro & Domingo, 2004).

En los últimos años las fibras en general como refuerzo del concreto han tenido un gran auge en Colombia. Argos, importante compañía del país, está investigando y trabajando en un concreto de Ultra alta resistencia que contiene fibras de acero y súper plastificantes.

#### Caso de El Oceanográfico de Valencia

En honor a Félix Candela se construyó en España una estructura en cascarón similar al restaurante Los Manantiales en México en el año 2000, L'Oceanografic (Ilustración 27 e



Ilustración 26), esta es una estructura compuesta por cuatro paraboloides hiperbólicos tiene un espesor de 6 cm y una luz de 40 m entre apoyos (Lázaro & Domingo).

Durante el proceso de diseño y construcción de esta estructura se presentaron tres problemas principales:

1. La desconfianza de los constructores con respecto al sistema estructural especialmente relacionado con la parte económica.
2. La exigencia de la norma con respecto a los espesores del diseño
3. El desconocimiento en los cálculos de estructuras laminadas.

Para la construcción de la formaleta se usaron tablas de pino de 2 m de largo y 8,5 cm de ancho ubicado en dos familias, en dirección a los dos planos que conforman los paraboloides hiperbólicos (Ver Ilustración 23). Estas se ubicaron sobre unas torres de cimbra y se amarraron con unos pernos para asegurar la geometría. En el armado de esta formaleta se demoraron un mes y medio, sin embargo, se debe tener en cuenta que por la falta de experiencia el rendimiento de esta actividad no fue el mejor y en los primeros lóbulos se demoraron más.



Fuente: (CMD Ingenieros, 2012)

**Ilustración 25. Proceso constructivo de la formaleta del Oceanográfico.**

Aunque se vio que no era necesario, con el fin de ser cuidadosos y cumplir la norma en algunos sectores críticos de la estructura se hizo una malla de refuerzo. Para el hormigonado se proyectó concreto por vía seca y se demoró dos meses teniendo en cuenta que el primer lóbulo tomó más tiempo que los demás.

Según el Ingeniero Alberto Domingo quien participó en la construcción y diseño de esta estructura los resultados fueron supremamente satisfactorios tanto para el equipo de diseño como para la empresa constructora, mostrando ventajas económicas sobre otras alternativas propuestas.



Fuente: (CMD Ingenieros, 2012)

**Ilustración 26. Restaurante Oceanográfico de Valencia A.**



Fuente: (CMD Ingenieros, 2012)

**Ilustración 27. Restaurante Oceanográfico de Valencia B.**

- **Domos monolíticos con inflables**

Los domos monolíticos empiezan en Estados Unidos con el interés de David B. South por la construcción de domos. Después de construir su primer domo monolítico en 1975 en Idaho, obtuvo su primera patente en 1979 (Domes, 2008). Especialmente en su país de origen se ha construido una numerosa cantidad de estos domos, alcanzando grandes luces y teniendo resultados satisfactorios.

La construcción de los domos monolíticos inicia con una base circular de concreto reforzado a la que se amarra el refuerzo del domo por medio de unos anillos. Luego un inflable diseñado específicamente con la forma y el tamaño de la estructura es puesto en la base y se infla por medio de ventiladores para obtener la forma requerida. Cuando el inflable este de la forma deseada se aplica en el interior una capa de espuma de poliuretano con el fin de no perder la presión interna y ayudar a sostener el refuerzo de acero que se pone posteriormente. Finalmente se usa una mezcla especial de concreto que es proyectado al interior del domo, cuando este alcance un espesor aproximado de 7,6 cm y cubra completamente el refuerzo el proceso está terminado.

El inflable consiste en la estructura que determina el tamaño y la geometría del cascarón, este puede ser de nylon recubierto de PVC o una tela de poliéster



- **Método de malla y tela de formaleta**

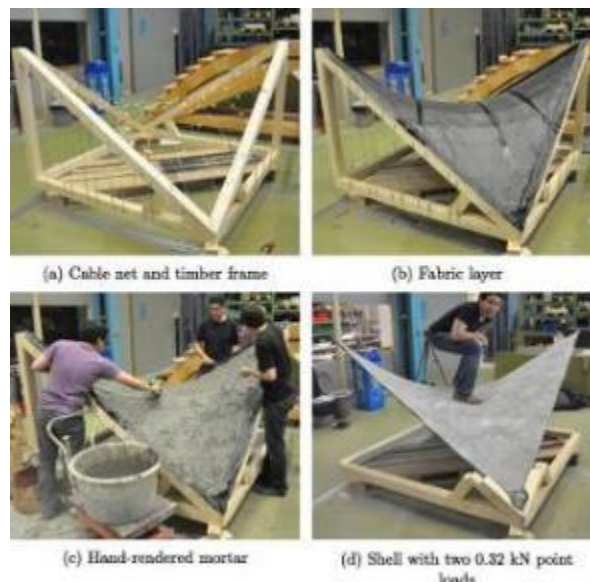
Estudios recientes realizados en la Universidad ETH de Suiza plantean una solución para la formaleta de las estructuras laminares. Con base en varios prototipos y modelos ensayados se diseñó Hilo (ver Ilustración 28) una unidad de innovación de Nest en la facultad de Empa and Eawag (Veenendaal & Block, 2014), este proyecto planea ser terminado en el año 2015 tras los satisfactorios resultados de la investigación.



Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 28. Diseño de Hilo.**

El sistema de formaletas propuesto consiste en una base que limita los bordes de la curva y una malla metálica que sostiene la tela que cumple el papel de formaleta. El concreto se proyecta a esta tela que después es retirada. La construcción del prototipo realizado en Suiza se resume en la Ilustración 29.



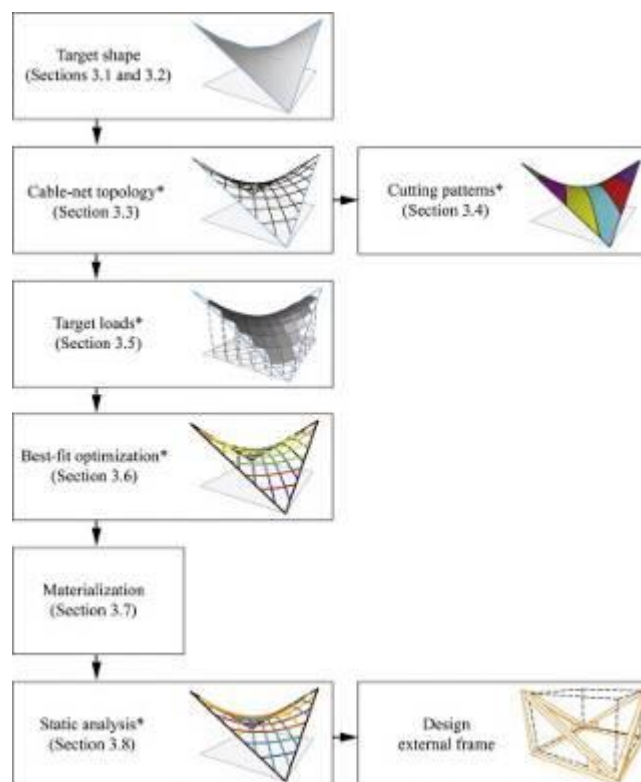
Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 29. Primera formaleta y lámina construida.**

Los pasos que siguió la ETH en su modelo son (Veenendaal & Block, 2014):

- Establecer los límites y la geometría de la estructura laminar.
- Generar la tipología del cable o malla metálica.
- Definir la superficie de la tela.
- Computar en el modelo las cargas presentes en los nodos, teniendo en cuenta la forma y el espesor.
- Realizar y mejorar la acomodación de los cables.
- Ubicación y materialización de los cables.
- Análisis estático del modelo.
- Diseño del marco que limita los bordes.

Estos se resumen en la Ilustración 30.



Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 30. Proceso del ETH para la construcción de modelo para sistema de malla de cable y tela.**

Con este sistema de formaleta se puede construir cualquier tipo de lámina que siga una geometría de doble curvatura. Sin embargo el método no es conocido y es nuevo, esto genera desconfianza.

- **Tela de concreto**

La tela de concreto o concreto Canvas es un producto desarrollado en Inglaterra por la empresa Canvas y consiste en un tejido flexible hecho de material compuesto. Este contiene cemento seco que se endurece al ser hidratada dejando una pequeña capa de concreto resistente al agua, al fuego y a los procesos de deshielo.

La manta tiene una lámina de PVC en una de las superficies que le permite ser un material completamente impermeable. Se fabrica en rollos de 1.0 m de ancho y en 3 espesores: CC5, CC8 y CC13, correspondientes a 5, 8 y 13 mm respectivamente. Bajo pedido, pueden fabricarse otros anchos y espesores (Canvas, 2013).



Fuente: (Canvas, 2013)

**Ilustración 31. Concreto Canvas.**

La empresa ofrece un formato de refugio (ver Ilustración 32) el cual se construye en poco tiempo y de manera eficiente con un inflable que le da la forma, estos refugios tienen varios beneficios, son resistentes y están diseñados para periodos de tiempo de 10 años. Esta es la aplicación que más se acerca a las estructuras laminares.



Fuente: (Canvas, 2013)

**Ilustración 32. Refugio Canvas.**

Aunque este material no ha sido implementado en proyectos de cascarones de hormigón, es flexible y se adapta a diferentes superficies incluyendo aquellas con doble curvatura, incluso antes de que el material fragüe la manta se puede cortar y anclar con herramientas manuales básicas. Esto permite que esta opción se evalúe como un posible método constructivo.

En la Tabla 2 se resumen los métodos recientes que se han desarrollado para la construcción de los cascarones de hormigón con el fin de facilitar la comparación y observar de manera clara las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 2. Comparación de métodos recientes

Método	Tipo de cascarón de hormigón (geometría)	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
Concreto reforzado con fibras de acero	Todos los tipos de cascarones de hormigón.	Mejora la resistencia a la flexo-tracción de la estructura sin necesidad de malla de refuerzo	No soluciona el problema de la formaletería	L´Oceanografic de Valencia
		Reduce tiempos de construcción, se elimina la disposición de la malla de refuerzo.	No está aprobado en la normativa de todos los países. Se desconoce el comportamiento del concreto con las fibras.	
		Da al material una resistencia homogénea, en todas las direcciones de la estructura.		
Domos monolíticos inflables	Domos	Requisitos simples de cimentaciones.	Restringen la geometría.	Varios coliseos en Estados Unidos.
			La tela inflable cuenta con una patente (US7013607 B1).	
Método de malla y tela de formaleta.	Curvas anticlásticas	Presenta una solución para la formaleta. Además es reutilizable	Solo se ha utilizado una vez	Solo se han realizado prototipos
		Obtiene la geometría óptima.		
		Disminuye la deflexión máxima y el espesor de la estructura.		
		No requiere de mano de obra calificada para el montaje de la formaleta		
		Permite el uso de materiales compuestos como concreto reforzado con fibras.		
Tela de concreto.	Paraboloides hiperbólicos	Formaleta reutilizable.	No ha sido utilizado para cascarones de hormigón	Refugios Canvas
		Facilidad de construcción. Se requiere 1 día para construir un “refugio”	Tienen un solo proveedor en el país	

### 3.1.3 Método viable

Durante la historia de la construcción de los casarones de hormigón se ha evidenciado que la geometría más eficiente para estas estructuras es el paraboloide hiperbólico o cortes de

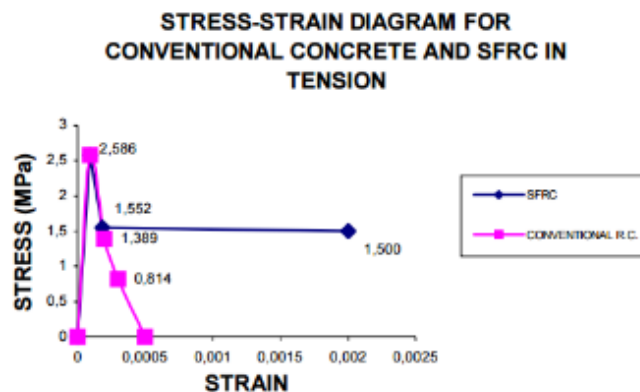
esta misma, debido a que está formada por rectas y esto simplifica el diseño y la construcción de la formaleta, así mismo disminuye los costos y permite una distribución de esfuerzos eficiente ya que no resiste flexión.

Además se encuentran ventajas en la propuesta del ingeniero Alberto Domingo de incluir fibras de acero en el concreto con el fin de eliminar la malla de refuerzo y mejorar las propiedades de flexo tracción del material. El ingeniero que participa en eventos a nivel mundial relacionados con el tema considera que esta opción combinada con una óptima geometría son el futuro de los cascarones y la forma viable de recuperar estas estructuras.

El método se elige por las múltiples ventajas que presenta;

- Elimina la malla de refuerzo. La malla de refuerzo además de aumentar los costos tiene una dificultad en su disposición debido a la geometría de la estructura, esta debe ubicarse en la dirección principal de esfuerzos o con máximo una desviación de  $10^\circ$  con respecto a esta, en el caso de un paraboloide hiperbólico la dirección principal de esfuerzos está en la dirección de las parábolas.
- Utiliza concreto proyectado. El concreto proyectado elimina el problema de la fluidez del concreto y las pendientes pronunciadas. Además en ensayos realizados por El Ingeniero en La Universidad de Valencia, se demostró que este presentaba un mejor comportamiento.
- Las fibras de acero aumentan la resistencia a flexo tracción del concreto y se distribuyen por toda el área de la estructura.
- El método fue utilizado exitosamente en una estructura construida en el año 2003 y en la actualidad no se ha presentado ningún problema con esta.

Asimismo, el comportamiento del material compuesto SRFC se muestra en el diagrama de la Ilustración 33. El SFRC presenta una resistencia residual después de la fisuración de aproximadamente 60%. Además la distribución de la fisuración en el material compuesto es uniforme y generalizada a diferencia del concreto con refuerzo convencional lo que permite una mejor distribución de esfuerzos, una mayor ductilidad y una menor posibilidad de fallas localizadas en la estructura (Prof. Dr. A. Domingo, 2004).



Fuente: (Prof. Dr. A. Domingo, 2004)

**Ilustración 33. Comportamiento a tensión del concreto reforzado con fibras de acero vs el concreto reforzado convencionalmente.**



A pesar de que el sistema constructivo propuesto por la universidad de Suiza no fue seleccionado como el método viable para la evaluación técnica y económica de este proyecto, durante la recolección de información se encontró un alto potencial en él. Sin embargo la razón por la cual no fue elegido es porque previamente se percibió la necesidad de profundizar en los estudios y realizar pruebas a escala real, este no se descarta y se ve como posible solución.

#### Método de malla y tela de formaleta:

El procedimiento tiene como objetivo diseñar un método constructivo que elimine la formaleta tradicional y optimice la curva de la estructura para disminuir las deflexiones. A pesar de la flexibilidad de la malla y el peso del concreto y la tela, la tensión de la malla debe ser diseñada de tal forma que la geometría final sea igual a la requerida según el diseño de la curva.

- Establecer los límites y la geometría de la estructura laminar.

Inicialmente se definen los límites de la estructura, como los bordes de un paraboloide hiperbólico. Estos límites se establecen con una estructura de madera como se muestra en la Ilustración 34, que posteriormente sostendrán la tela y la malla, haciendo el papel de obra falsa en conjunto con la malla metálica.



Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 34. Marco de madera del prototipo realizado en la ETH.**

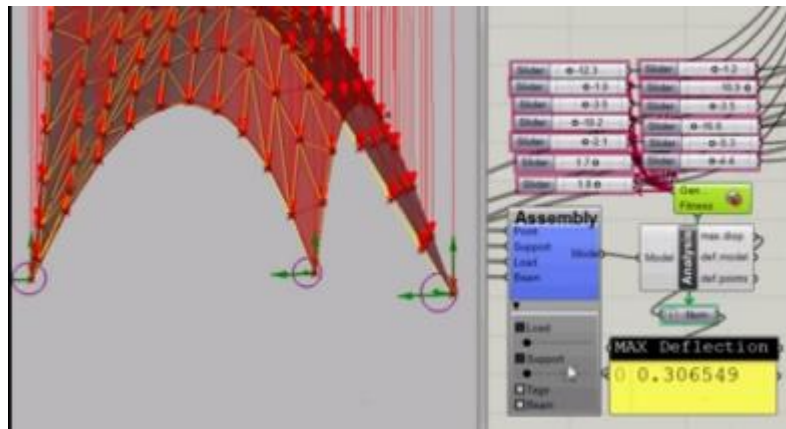
Este marco de madera es retirado cuando la concha está curada, dejando los bordes inferiores que generan 4 restricciones en los apoyos de la estructura, 3 de traslación y 1 de rotación.

La definición de la curva es un paso importante, cualquier cambio en la geometría de la concha puede cambiar drásticamente el comportamiento estructural y el espesor requerido. El objetivo de este método es variar la geometría del paraboloide inicial sin modificar los bordes hasta encontrar la curva más óptima, condicionando la curva a permanecer anti-

clástica. La curva objetiva es aquella que minimiza la máxima deflexión y optimiza el espesor del cascarón (Veenendaal & Block, 2014).

Un software realiza una rutina de optimización de la curva analizando de forma paramétrica algunas variables, para finalmente seleccionar la geometría óptima de la estructura, la cual minimiza las deflexiones, el espesor y los esfuerzos. En el programa se define la geometría inicial como una malla de nodos a los cuales se les modifica la coordenada en el eje z, manteniendo fijos los bordes hasta encontrar la geometría ideal, además se define un rango admisible para el espesor de la lámina de concreto con el fin de cumplir la norma.

La carga utilizada en el proceso de optimización es la carga muerta, que equivale al peso propio de la estructura con una densidad de concreto de  $24 \text{ kN/m}^3$ . En la Ilustración 35 se puede observar un ejemplo de optimización en el software Karamba.



En: <https://www.youtube.com/watch?v=33E1vtbONsk>, 2015.

**Ilustración 35. Resultado del software Karamba de la optimización de la curva.**

- Generar la topología del cable o malla metálica.

Para definir la malla de cables metálicos es importante considerar ciertos criterios; los cables deben ser continuos y terminar en los bordes del marco, deben formar una malla geodésica que sirva para sostener la tela, manteniendo los mismos patrones de corte de esta y la densidad de la malla debe ser suficiente para no requerir gran cantidad de preesfuerzos de tensión en la tela. El ancho de la malla también es diseñado por medio de un algoritmo en un programa computacional.

- Definir la superficie de la tela.

Para disminuir pérdidas y mejorar la manejabilidad de la tela, se subdivide por medio de un algoritmo que entrega los patrones más eficientes.





Fuente: (Veenendaal & Block, 2014)

**Ilustración 36. Corte del geotextil para la construcción de la formaleta.**

- Computar en el modelo las cargas presentes en los nodos, teniendo en cuenta la forma y el espesor.

Teniendo en cuenta el espesor de la estructura y el peso de la tela se encuentran las fuerzas por peso propio en cada nodo (como se mencionó anteriormente la curva se divide en una malla para su análisis y diseño.), cada nodo tiene un área tributaria que se asigna por el método de los polígonos de Thiessen.

- Realizar y mejorar la acomodación de los cables.

Para el correcto funcionamiento de la malla de cables es importante encontrar la tensión en cada uno de estos. La tensión de los cables debe soportar el peso de la tela y del concreto húmedo y alcanzar la geometría de la curva diseñada.

Para encontrar estas fuerzas los suizos utilizaron un análisis no lineal y el algoritmo de Levenberg-Marquardt, en donde se busca minimizar las diferencias en las coordenadas x, y, z con respecto a la curva objetivo mientras se satisface un equilibrio estático (Veenendaal & Block, 2014).

- Ubicación y materialización de los cables.
- Análisis estático del modelo.

- Diseño del marco que limita los bordes.

En suiza se realizaron dos prototipos exitosos de este método mostrando su viabilidad técnica. Trayendo las cantidades del estudio realizado al contexto colombiano el costo del prototipo se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3 Costo en Colombia del prototipo realizado en suiza.**

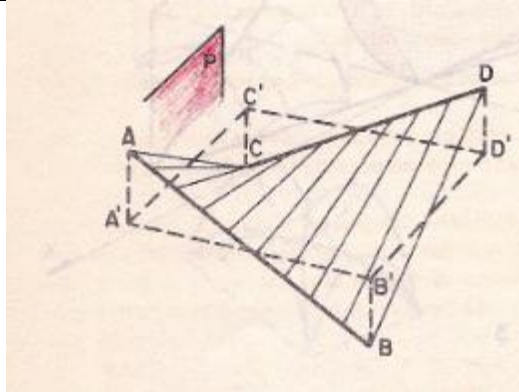
Item/tipo	Cantidad	Costo unitario	Costo
<b>Tablones de madera para el marco</b>	25 m	\$ 24,684.21	\$ 617,105.26
<b>Tela/ geotextil</b>	0.05 m <sup>2</sup>	\$ 450,080.00	\$ 22,504.00
<b>Pasador rizado</b>	60 unidades	\$ 250.00	\$ 15,000.00
<b>Cable de acero inoxidable 1.5 mm</b>	100 m	\$ 1,700.00	\$ 170,000.00
<b>Alambre de acero 1mm</b>	0.6 kg	\$54,000.00	\$ 32,400.00
<b>Tachuelas</b>	0.5 kg	\$ 5,200.00	\$ 2,600.00
<b>Tornillos M6x40</b>	20 unidades	\$ 1,500.00	\$ 30,000.00
<b>Aros metálicos 6mm</b>	60 unidades	\$ 500.00	\$ 30,000.00
<b>Tensores M5</b>	20 unidades	\$ 5,400.00	\$ 108,000.00
<b>Mosquetón 4mm</b>	40 unidades	\$ 9,000.00	\$ 360,000.00
<b>Total</b>	-	-	<b>\$1,387,609.26</b>

Este prototipo es de aproximadamente 3.24 m<sup>2</sup> es decir un m<sup>2</sup> de formaleta más cimbra cuesta aproximadamente \$428,274.46, sin embargo esta aproximación no es exacta y se espera que a mayor tamaño de la estructura el precio disminuya significativamente.

## **3.2 EVALUACIÓN TÉCNICA DE UNA ESTRUCTURA EN CASCARÓN**

### **3.2.1 Definición geométrica y distribución de esfuerzos.**

Un paraboloide hiperbólico se puede concebir de varias formas, a partir de otros conceptos geométricos. Inicialmente se puede plantear la geometría con base en rectas generatrices, el paraboloide se define con una recta paralela al plano P de la Ilustración 37, que se desliza apoyándose sobre dos rectas de pendiente inversa, AB y CD



Fuente: (Pérez F. J., 1965)

**Ilustración 37. Paraboloides hiperbólico a partir de rectas generatrices.**

El paraboloides también se puede definir basándose en el paralelogramo de la Ilustración 37,  $A'B'D'C'$ , moviendo sus vértices en el eje de coordenadas  $z$ ,  $A'$  y  $D'$  en la dirección positiva y  $B'$  y  $C'$  en la dirección negativa, asumiendo que el origen de coordenadas ( $z=0$ ) se encuentra en la posición inicial del paralelogramo.

Por último, los paraboloides hiperbólicos se pueden definir a partir de dos parábolas generatrices de curvatura inversa. Estas parábolas se forman siguiendo la curva entre los puntos  $AD$  y  $BC$  de la Ilustración 37, desplazando estas parábolas de sentido contrario entre los límites definidos por  $ABDC$  se obtiene el paraboloides hiperbólico.

La dirección principal de los esfuerzos en los paraboloides hiperbólicos es generalmente la dirección de las parábolas. En un arco o curva en forma de parábola los esfuerzos son de compresión y tracción, distribuidos uniformemente en el área de la estructura y los momentos son cero en toda el área. “Las conchas son a las losas corrientes lo que los arcos son a las vigas rectas” (Pérez F. J., 1965)

Las curvas paralelas a la parábola  $AD$  actúan como cuerdas y están sometidas a esfuerzos de tracción mientras que las curvas paralelas a la parábola  $BC$  actúan como arcos y están sometidas a esfuerzos de compresión.

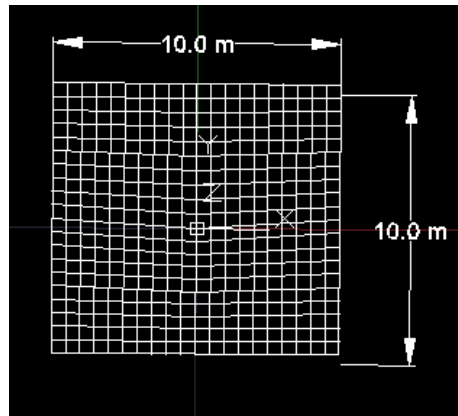
**Caso de estudio**

Para el caso de estudio se eligió diseñar una estructura laminar de tipo “paraguas invertido” que consiste en la unión de cuatro cuartos de un paraboloides hiperbólico que se unen en sus bordes y se apoyan en el centro en una columna. Esta geometría es reconocida gracias a Félix Candela, fue utilizada para la construcción de La Fábrica de Licores de Antioquia y hoy en día es utilizada por las estaciones de gasolina Repsol en España.

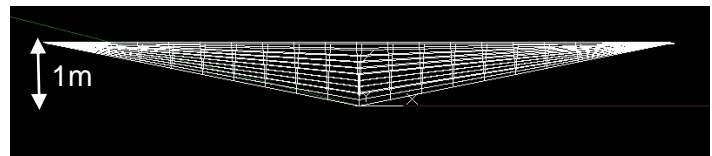
Los “paraguas invertidos” están formados de una geometría reglada y alcanzan grandes luces con un solo apoyo, además, estas pueden ser utilizadas como unidades elementales para la construcción de estructuras de mayor envergadura (tamaño), logrando áreas más grandes sin apoyos, mediante su integración repetitiva haciendo unión en los bordes de cada uno.

Se definió una geometría similar a la de La Fábrica de Licores de Antioquia de 10 m de ancho por 10 m. de largo y una altura de 1 m entre el apoyo central y los bordes extremos de los paraboloides (de ahora en adelante a esta altura se le llamará H), el apoyo es una columna cuadrada de concreto reforzado con un área de 45 cm x 45 cm

cm y una altura de 4 m libres.



Vista superior



Vista frontal

**Ilustración 38. Geometría de caso aplicado.**

Tomando como referente el libro ADVANCE REINFORCE CONCRETE DESIGN de N.KIRSHNA RAJU (Raju, 1986), el cual presenta ejemplos de diseño estructural basados en la norma hindú; en adición a las construcciones existentes del mismo tipo; se supone para los modelos de análisis y diseño de la estructura un espesor inicial de 6 centímetros.

### 3.2.2 Norma Colombiana de Construcción sismo resistente NSR10

La Norma Colombiana de Construcción, en el Título C, Concreto estructural, incluye un capítulo dedicado a cáscaras y losas plegadas, el capítulo C.19. En este capítulo se reglamenta su análisis, su diseño y su construcción e incluye nervaduras y elementos de borde. Los cascarones no solo deben cumplir con lo indicado en este capítulo, todo requisito que esté presente en la norma que aplique y no contradiga lo dicho en este debe ser considerado.

La norma permite el análisis por medio de métodos aproximados para estructuras laminares si se demuestra que este proporciona seguridad para el diseño. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Algunos requisitos importantes que se mencionan en la norma:

- Los requisitos para las dimensiones y el refuerzo de la viga de borde se encuentran en el capítulo C.8.12.
- La resistencia mínima del concreto a los 28 días es de 21 MPa.

- El refuerzo en la estructura no debe ser menor al exigido por refracción y temperatura en la norma (0.2%) y su separación no debe exceder los 450 mm ni cinco veces el espesor de la cáscara, además se debe realizar el anclaje según el capítulo C.12 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

---

*C.19.4.1. El refuerzo de la cáscara se debe proporcionar para resistir los esfuerzos de tracción provocados por las fuerzas internas de la membrana, para resistir la tracción producida por los momentos de flexión y de torsión, para controlar la fisuración por retracción y temperatura y para actuar como refuerzo especial en los bordes de la cáscara, en los puntos de aplicación de la carga y en las aberturas de la cáscara (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)*

---

- La dirección del refuerzo no debe variar con respecto a la dirección principal de esfuerzos más de  $10^\circ$  (desventaja del refuerzo con respecto a las fibras de acero).

### 3.2.3 Modelo SAP2000

El software SAP2000 tiene la alternativa de análisis y diseño de cascarones de hormigón, la geometría se puede definir como una sección de área o exportarla de otros programas como Excel y AutoCad (ver Ilustración 39).

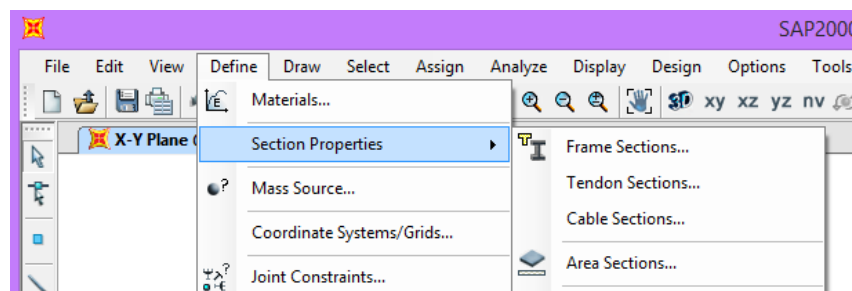


Ilustración 39. Definición de cascarones en SAP2000.

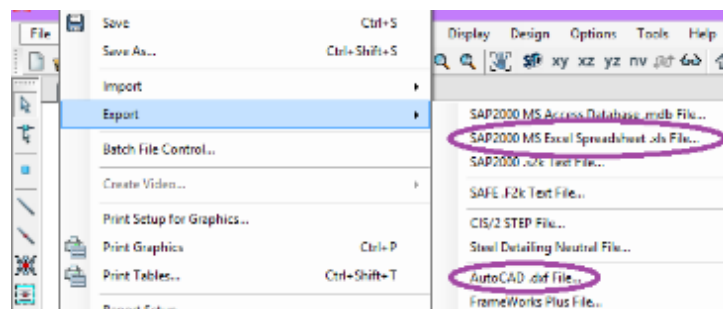


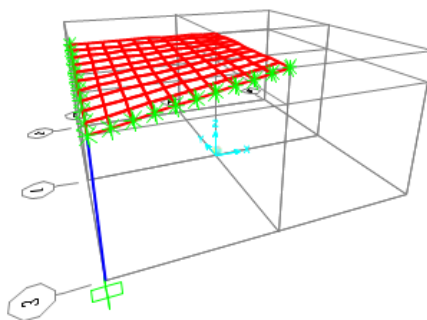
Ilustración 40. Exportación de geometría a SAP2000.

Además el programa tiene cascarones de geometrías típicas como prototipos a los cuales se les puede modificar ciertos parámetros y al mismo tiempo se puede modificar la geometría (ver Ilustración 40).

### **Caso aplicado**

Se planteó el modelo como un cuarto de la estructura ya que es simétrica y es suficiente con el diseño de este (Ver Ilustración 41). Esta geometría equivale a un cuarto de un paraboloides hiperbólico y se obtiene cortando el prototipo que tiene el programa. Al solo modelar un cuarto de la estructura se debe restringir el movimiento de los bordes donde continúa la estructura.

Para solo modelar un cuarto de paraboloides se tienen que tener en cuenta ciertas consideraciones importantes como restricción de movimiento en la dirección de la porción faltante de la estructura, todos los nodos señalados en verde en la Ilustración 41 se restringen a traslación en esta dirección, el punto del apoyo se restringe en dos direcciones, además para las dos esquinas contrarias de estos bordes se supone una igual deformación.



**Ilustración 41. Modelo del caso aplicado en SAP2000.**

La curva se divide en una malla para hacer el análisis por elementos finitos. El tamaño de los elementos influye en los resultados, si la malla se divide más, entonces los resultados se aproximan más a la realidad y las deformaciones obtenidas son más correctas. La malla del caso de estudio está formada por 10 recuadros de 50 cm x 50 cm en cada dirección.

Las cargas incluidas en el modelo son, carga muerta (con un peso propio de concreto reforzado de 24 kN/m<sup>3</sup>) con un factor de mayoración de 1.2 y carga viva (5 kN/m<sup>2</sup> según la NSR10 capítulo B) con un factor de mayoración de 1.6. La carga viva se distribuye uniformemente sobre el área del cascarón, como “Uniform (Shell)”

El concreto de diseño tiene un  $f'_c$  de 25 MPa y un  $E$  de  $4750 * \sqrt{f'_c}$ , además el tipo de superficie utilizada en el modelo es membrana, este es una estructura liviana que solo resiste esfuerzos de tracción y de compresión, no tiene rigidez a tracción.

Después de correr el modelo se pueden observar los esfuerzos máximos y mínimos distribuidos en la curva y sus magnitudes, el programa tiene rangos de esfuerzos como se muestra en la Ilustración 42 y la Ilustración 43 con diferentes colores. Los rangos de esfuerzos se observan en la barra de la derecha y las unidades están en MPa.

En los extremos laterales coincidiendo con “la cuerda” más grande se encuentra el esfuerzo máximo de tracción; 4.063 MPa (Ver Ilustración 42) y en el apoyo de la columna, donde termina el arco más largo se presenta el mayor esfuerzo a compresión; -7.74 MPa (Ver Ilustración 43).

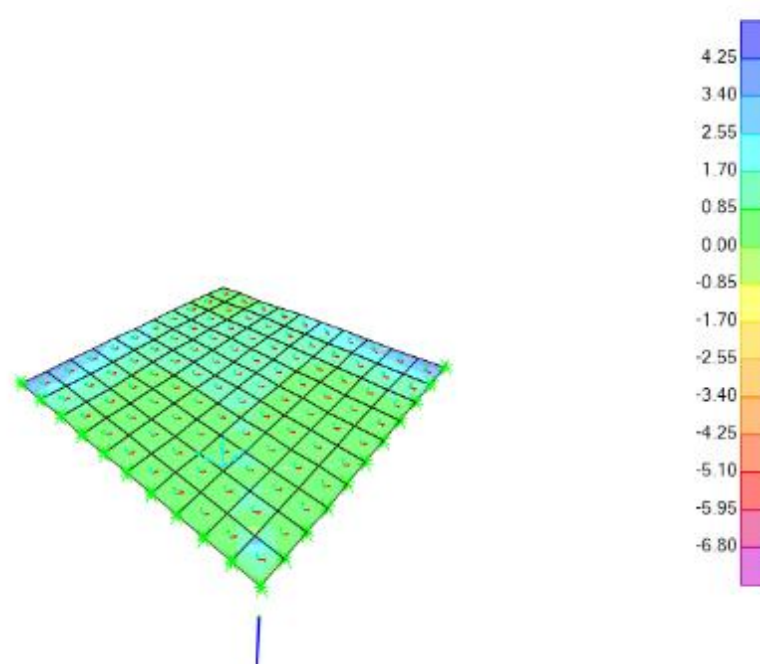
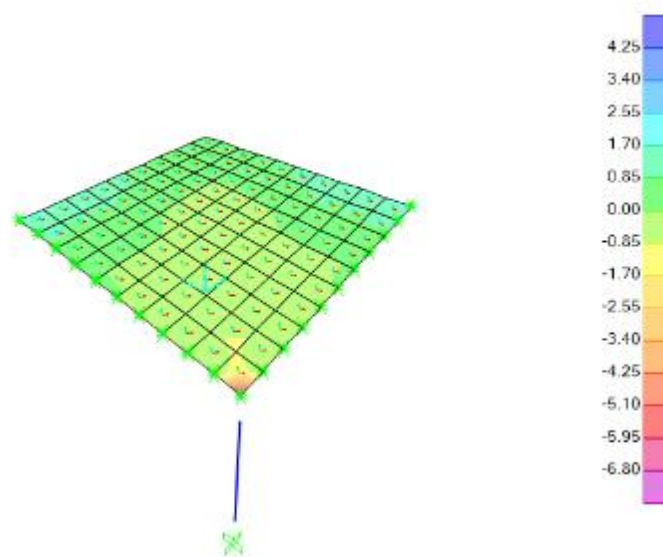
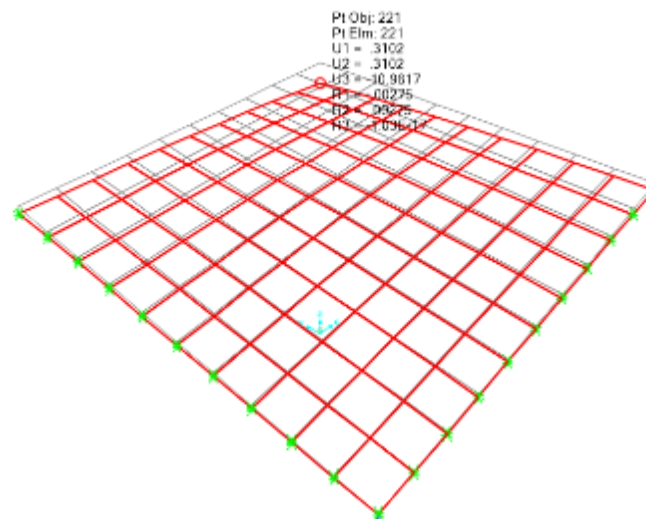


Ilustración 42. Esfuerzos máximos en un cuarto del “paraguas”.



**Ilustración 43. Esfuerzos mínimos en un cuarto del “paraguas”**

Además es posible ver la estructura deformada después de ser sometida a la combinación de cargas del modelo, como se ve en la Ilustración 44, las líneas azules muestran la geometría original y las rojas muestran la estructura deformada. En el extremo del fondo se presenta la mayor deformación, en este punto la estructura se deforma 11 mm en la dirección Z y 0.3 mm en X y Y.

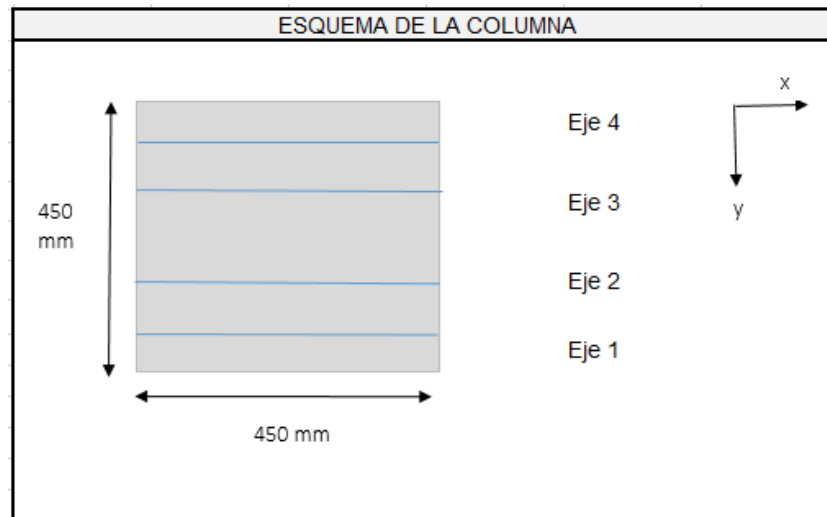


**Ilustración 44. Estructura deformada y deformación máxima.**



- Columna

Aunque la mayor demanda de la columna es debido a las cargas sísmicas no se cuenta con varios parámetros para realizar el diseño sísmico de esta; el tipo de suelo, la zona de amenaza, la rigidez de la estructura y la fuerza lateral. Para el caso de estudio se supone que la estructura está en una zona de amenaza sísmica baja y este tipo de carga se asume como mínima en el diseño. No obstante, esta carga es importante tenerla en cuenta en el momento de diseñar la estructura e influye en los aspectos económicos y técnicos.



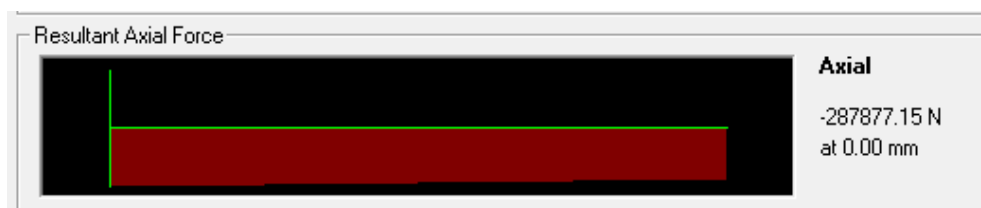
**Ilustración 45. Área transversal de la columna de apoyo.**

La columna tiene una sección transversal de 450 mm de ancho por 450 mm de largo, el refuerzo de acero en la columna se distribuye en 4 ejes como se muestra en la Ilustración 45. En la Tabla 4 se presentan los datos de los materiales de la columna y la distribución de los ejes.

**Tabla 4. Datos de la columna y sus materiales**

INGRESAR LOS DATOS DE LA COLUMNA A DISEÑAR			
Propiedades de los materiales		Distancias $X_i$ para el acero	
$f'_c$	25 MPa	$X_1$	400mm
$f_y$	414 MPa	$X_2$	300mm
E	200000 MPa	$X_3$	150mm
$\epsilon_c$	0.003	$X_4$	50mm
$\epsilon_y$	0.0021		
	0.005		
Dimensiones de la columna		Propiedades del acero	
b	450mm	r	50mm
h	450mm	d'	50mm
d	400mm		

La columna con una altura de 4 m se modela en SAP2000 para obtener la carga axial máxima. Como el modelo de SAP2000 es solo un cuarto de la estructura esta carga se multiplica por cuatro para obtener la carga máxima que soporta la columna realmente.

**Ilustración 46. Diagrama de fuerzas axiales en la columna**

Se realiza el diagrama de interacción para una cuantía mínima en columnas del uno por ciento y en este se ubica la carga máxima obtenida con el programa SAP2000. Este se realizó en Excel, con  $\phi$  de 0.9 y variando C (compresión en el concreto) con un factor que va aumentando 0.01 hasta 1, este factor se multiplica por la altura de la sección y se obtiene C. El diagrama de interacción se presenta en la Ilustración 47.

En la Tabla 5 se presenta la combinación máxima de cargas para la cual se diseñó la columna de la estructura, la carga axial es cuatro veces la carga entregada por el software y el momento es el momento en la base para una zona de amenaza sísmica baja.

### Diagrama de interacción cuantía 1%



**Ilustración 47. Diagrama de interacción y carga de la columna**

**Tabla 5.combinación máxima carga axial/momento.**

Cargas y Momentos Últimos	
$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN.m)
1151.51	7.49

Aunque el momento del modelo es cero se toma un momento mínimo que corresponde al momento en la base de la columna en una zona de amenaza sísmica baja. Este momento se obtiene por el método de fuerza lateral equivalente y corresponde a:

$$M = \frac{2.5 * W * 0.05 * H}{9.8} = \frac{2.5 * 146.88 * 0.05 * 4}{9.8} = 7.49$$

Donde,

W es el peso de la lámina de concreto;

H es la altura de la columna.

Tabla 6. Datos de refuerzos

Propiedades del acero		Áreas de acero	
$\rho$	1.0%	$A_{s1}$	675 mm <sup>2</sup>
$r$	50 mm	$A_{s2}$	225 mm <sup>2</sup>
$A_s$	1800 mm <sup>2</sup>	$A_{s3}$	225 mm <sup>2</sup>
$d'$	50 mm	$A_{s4}$	675 mm <sup>2</sup>

El refuerzo está conformado por varillas número 4; tiene 6 varillas en el primer eje y en el último y 2 varillas en los dos ejes centrales.

### 3.2.4 Métodos aproximados

Existen métodos aproximados que simplifican el análisis de este tipo de estructuras con suposiciones que no se alejan de la realidad debido a la naturaleza de estas. Estos métodos fueron usados para el diseño de algunos cascarones a través de la historia.

Para el análisis y diseño de paraboloides hiperbólicos hay métodos que suponen (Pérez F., 2015);

- Los momentos en la estructura cero y los esfuerzos de compresión y tracción uniformes en toda el área.
- Las cargas se dividen en partes iguales entre los arcos y las cuerdas.
- La dirección principal de esfuerzos está en la dirección de las parábolas generatrices del paraboloide.
- El espesor de la cubierta es uniforme y la geometría construida es exactamente un paraboloide hiperbólico.

Para encontrar la tracción y la compresión en cualquier punto del paraboloide se toma un arco, FO, y una parábola, EO, como se muestra en la figura A de la Ilustración 48, cada una de estas curvas tiene una carga distribuida y uniforme que equivale a la mitad de la carga total del paraboloide (figuras B y C).

W, la carga total por área, distribuida en el paraboloide, equivale a la suma de la carga muerta y la carga viva del cascarón. La carga muerta se obtuvo con una densidad para el concreto de 24 kN/m<sup>3</sup> y la carga viva se tomó de la NRS10 título B, 5 kN/m<sup>2</sup>.

$$W = Cm + Cv = \left( 24 \frac{kN}{m^3} * (e \, m) \right) + 5 \frac{kN}{m^2}$$

Donde e es el espesor del cascarón.

El arco y la cuerda tienen esfuerzos de la misma magnitud, con sentido contrario, por esto se muestra el análisis de uno solo. Se corta por el centro el arco FO como se muestra en la figura D y se obtiene el diagrama de fuerzas. Si la longitud del arco FO es  $2b$  y la altura central de la parábola es  $f$  entonces se puede definir;

El cortante en el extremo F haciendo equilibrio en la dirección de la carga.

$$V = \frac{w}{2} * b$$

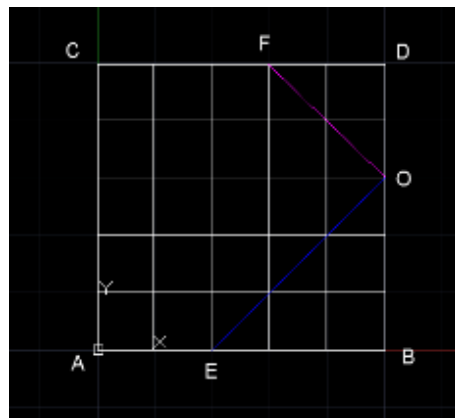
La carga en el arco Fh haciendo momentos en el punto F.

$$Fh * f - \left(\frac{w}{2}\right) * \frac{b^2}{2} = 0$$

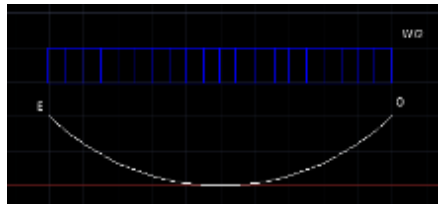
$$Fh = \frac{wb^2}{4f}$$

Cuando se analiza el “paraguas invertido” se toma el arco CB de la figura A, en este caso  $b$  equivale a la mitad de la distancia entre C y D y  $f$  se remplaza con  $H$ , esto se puede asumir debido a la propiedad de las parábolas que se muestra en la figura E, donde  $H$  es igual a 2 veces  $f$ .

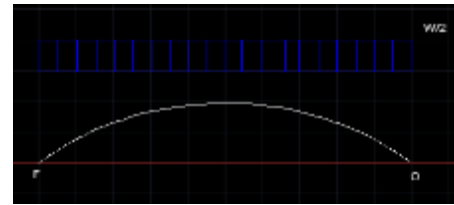
$$Fh = \frac{wb^2}{2H}$$



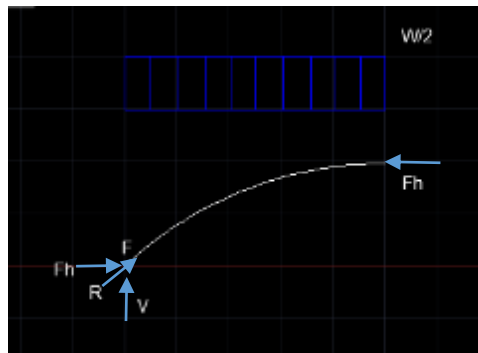
A. Planta de un paraboloide hiperbólico



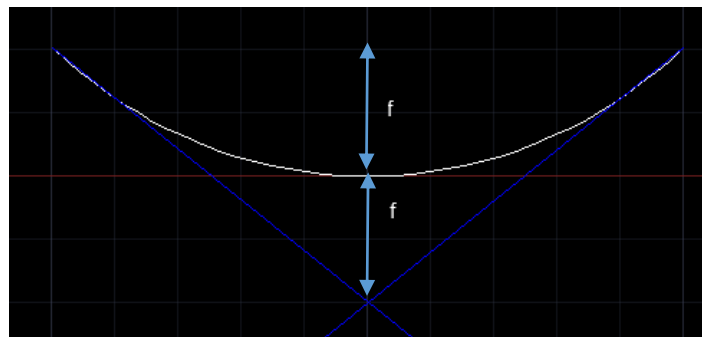
B. Arco EO con peso distribuido uniformemente



C. Arco FO con peso distribuido uniformemente



D. Diagrama de fuerzas-corte arco FO



E. Parábola

Ilustración 48. Definición de esfuerzos en un paraboloides hiperbólico.

### **Caso de estudio**

Se diseña el caso de estudio con métodos aproximados, asumiendo una geometría inicial que se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos del caso de estudio.

Datos	
Espesor e	0.06 m
B	5 m
H	1 m
Densidad del concreto	24 kN/m <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción de las fibras	1200 kN/m <sup>2</sup>

La carga uniformemente distribuida equivale a la suma del peso propio y de la carga viva exigida por la norma.

$$W = \left( 24 \frac{kN}{m^3} * 0.06m \right) + 5 \frac{kN}{m^2} = 6.44 \frac{kN}{m^2}$$

La carga principal en el cascarón es

$$Fh = \frac{wb^2}{2H} = \frac{6.44 * (5^2)}{2 * 1} = 80.5 \frac{kN}{m}$$

La cuantía mínima por refracción es de 0.2%, si el área requerida es menor que esta se debe poner el área mínima de acero exigida por la norma.

$$A_{s\text{mínima}} = \frac{0.2}{100} * 1000 * 60 = 120 \frac{mm^2}{m}$$

La resistencia de las fibras de acero a la tracción es de 1200 MPa. Para el diseño se disminuye esta resistencia al 60%.

$$A_s = \frac{80.5 \frac{kN}{m} * 10^3}{720} = 111.8 \frac{mm^2}{m}$$

Se obtiene un área menor a la mínima, este espesor es suficiente y se debe utilizar el área mínima.

Si el diseño se hace para un refuerzo convencional con una resistencia de 410 MPa, el área de acero necesaria.

$$A_s = \frac{80.5 \frac{kN}{m} * 10^3}{246} = 327.23 \frac{mm^2}{m}$$

Con 5 varillas número 3 por metro de cascarón se obtiene un área de 356.25. la estructura de 10 m de largo necesitaría 50 varillas número 3 en cada dirección.

- Costillas

La longitud de las costillas  $L_c$

$$L_c = \sqrt{5^2 + 1^2} = 5.1 \text{ m}$$

La altura de la costilla se asume de 200 mm de los cuales 60 pertenecen al espesor del cascarón. La relación de la longitud y la altura

$$\frac{L_c}{b} = \frac{5.1}{0.2} = 25.5 > 12$$

Con esta relación entre la altura y la longitud de la costilla mayor a 12, el elemento debe ser diseñado como una columna esbelta.

Coeficiente de reducción,  $c = 1.25 - \frac{L_c}{48 \cdot b} = 0.72$

$$P = \left( 80.5 \frac{kN}{m} * 5m * 2 \right) = 821.1 kN$$

Donde P es la carga máxima a compresión en el apoyo. Usando una cuantía mínima de 1% y el 60% de la resistencia del concreto y del acero.

$$P = c * (\sigma_c * A_c + \sigma_s * A_s)$$

$$A_s = 0.01 * A_r$$

$$A_c = 0.99 * A_r$$

Donde,

$A_c$  es el área de concreto

$A_s$  es el área de acero

$A_r$  es el área transversal de las costillas

$$P = c * (0.99 * \sigma_c * A_r + 0.01 * \sigma_s * A_r)$$

$$821.1 * 10^3 = 0.72 * (0.99 * 15 * A_r + 0.01 * 246 * A_r)$$

$$A_r = 65881.96 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ancho de la costilla} = \frac{65881.96 \text{ mm}^2}{200 \text{ mm}} = 329.4 \text{ mm}$$

Las costillas quedan con un área de 350mm\*200mm

$$A_s = 0.01 * (350 * 200) = 700 \text{ mm}^2$$

6 varillas número 4 cumplen con esta área. 760.1 mm<sup>2</sup>.



---

- Vigas de borde

La tensión máxima equivale a la carga principal del cascarón por la longitud

$$F = 80.5 * 5 = 402.5 \text{ kN}$$

Según la ACI

$$F = A_g * (0.18 * f_c + 0.8 * f_s * \rho)$$

Donde

F, es la carga principal del cascarón por unidad de longitud

A<sub>g</sub>, es el área transversal de la viga de borde

F<sub>c</sub>, es el 60% de la resistencia del concreto

F<sub>s</sub> es el 60% de la resistencia del acero

ρ, es la cuantía de acero en la viga

Si se asume como dimensiones de la viga 200mm de alto por 350 mm de ancho entonces,

$$\frac{\left[ \frac{41043.6}{20 * 35} - (0.18 * 250) \right]}{0.8 * 1400} = \rho = 0.0122 = 1.2\%$$

$$A_s = 0.012 * (200 * 350) = 852.1 \text{ mm}^2$$

5 varillas número 5 de acero conforman el refuerzo de las vigas de borde.

Ninguno de los elementos de la estructura tiene más de 6 metros, que es una longitud comercial de las varillas de acero. Por esta razón en ninguno de los diseños se revisan los traslapes.

### 3.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA ESTRUCTURA EN CASCARÓN

#### 3.3.1 Volúmenes y cantidades.

- Cascarón:

El cascarón tiene un espesor de 0.06 metros, un área proyectada en planta de 100 metros cuadrados, un área de concreto de 102 metros cuadrados y un volumen de 6.12 metros cúbicos. El área de cimbrado equivale al área proyectada.

La dosificación de fibras de acero es de 50 kg/m<sup>2</sup>, la empresa Sika vende la fibra con las especificaciones requeridas por paquetes de 20 kg.

$$\text{Total de fibras} = 50 \text{ kg/m}^2 * 6.12 \text{ m}^2 = 306 \text{ kg}$$

$$\text{Número de paquetes} = 306 \text{ kg} / 20 \text{ kg} = 16 \text{ paquetes.}$$

La cimbra u obra falsa se tomó como alquiler en el presupuesto. El costo del arrendamiento se entrega por el proveedor por día por m<sup>2</sup>.

Los días en los que se dispondrá de la obra falsa (Tabla 8) se calculan teniendo en cuenta los rendimientos encontrados por El Ingeniero Alberto Domingo y el tiempo de desencofrado. El costo del metro cuadrado por día es de 1300 pesos, es decir que el costo por metro cuadrado en el caso de estudio es de \$ 88,400.00.

**Tabla 8. Días necesarios para el cimbrado del proyecto.**

<b>Actividad</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Días</b>
Encofrado	3.04 h/m <sup>2</sup>	102 m <sup>2</sup>	38.8
Hormigonado	1.31 h/m <sup>3</sup>	6.12 m <sup>3</sup>	1
Resistencia			28 días
<b>Total</b>			<b>67.8</b>

- Columna

La columna es cuadrada, tiene un área de 0.20 metros cuadrados, una altura de 4 metros y un volumen de 0.81 metros cúbicos.

La cuantía de acero es del 1%, esta equivale aproximadamente a 16 varillas número 4. El peso por metro de las varillas número 4 es 0.994 kg/m. (Construcción).

$$\text{Peso de acero} = \left[ \left( 0.994 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 4\text{m} * 16 \right) \right] = 63.62 \text{ kg}$$

- Vigas de borde.

Son ocho vigas de borde que se ubican en los límites del cascarón. Cada una de las vigas tiene un área de 0.07 metros cuadrados, una longitud de 5 metros y un volumen de 0.35 metros cúbicos. El volumen total de las 8 vigas de borde es de 2.8 metros cúbicos.

La cuantía de acero es del 1.2%, esta equivale aproximadamente a 5 varillas número 5. El peso por metro de las varillas número 5 es 1.55 kg/m (Construcción).

$$\text{Peso de acero} = \left[ \left( 1.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 5\text{m} * 5\text{varillas} * 8 \text{vigas} \right) \right] = 310 \text{ kg}$$

El área de la formaleta es igual a 16 m<sup>2</sup> (0.2\*5\*2\*8) más 14 m<sup>2</sup> (0.35\*5\*8).

- Costillas.

Son cuatro costillas ubicadas en los bordes donde se unen las 4 secciones de paraboloide. Cada una de las costillas tiene un área de 0.07 metros cuadrados, una longitud de 5.1 metros y un volumen de 0.357 metros cúbicos. El volumen total de las 4 costillas es de 1.42 metros cúbicos.

La cuantía de acero es del 1%, esta equivale aproximadamente a 6 varillas número 4. El peso por metro de las varillas número 4 es 0.994 kg/m (Construcción).

$$\text{Peso de acero} = \left[ \left( 0.994 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 5\text{m} * 6 \text{ varillas} * 4 \text{ costillas} \right) \right] = 119.28 \text{ kg}$$

El área de la formaleta es igual a 8.16 m<sup>2</sup> (0.2\*5.1\*2\*4) mas 7.14 m<sup>2</sup> (0.35\*5.1\*4).

### 3.3.2

### 3.3.3 Rendimiento

De la construcción del Oceanografic de Valencia se obtuvieron los siguientes rendimientos.

**Tabla 9. Rendimientos de la construcción del Oceanografic**

	Rendimiento típico	Rendimiento alcanzado
Encofrado	1.55 h/m <sup>2</sup>	3.81 h/m <sup>2</sup>
Hormigonado	1.33 h/m <sup>3</sup>	2.09 h/m <sup>3</sup>

Sin embargo al inicio de la obra por falta de experiencia hubo mucha pérdida de tiempo y el rendimiento se vio afectado notablemente. Eliminando esos errores el rendimiento alcanzado podría ser aproximadamente lo que se define en la Tabla 10.

**Tabla 10. Rendimientos después de eliminar errores.**

	Rendimiento alcanzado
Encofrado	3.04 h/m <sup>2</sup>
Hormigonado	1.31 h/m <sup>3</sup>

Con la experiencia y la mejora en las técnicas este rendimiento se puede mejorar.

### 3.3.4 Análisis de precio unitario APU

**Tabla 11. APU caso de estudio, cascarón.**

Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Concreto lanzado	6.12 m <sup>3</sup>	\$ 1,113,000.00	\$ 6,811,560.00
Fibras de acero SIKA fiber 65/35	16 paquetes	\$ 123,300.00	\$ 19,728,000.00
Formaleta	102 m <sup>2</sup>	\$ 25,000.00	\$ 2,500,000.00
Cimbrado + mano de obra.	100 m <sup>2</sup>	\$ 88,400.00	\$ 8,840,000.00
Herramienta menor	5%	\$ 378,795.60	\$ 1,893,978.00
Mano de obra	6.12 m <sup>3</sup>	\$ 30,000.00	\$ 183,600.00
<b>Total</b>			<b>\$ 39,957,138.00</b>

Tabla 12. APU caso de estudio, columna.

Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Concreto	0.81 m <sup>3</sup>	\$ 337,608.75	\$273,463.09
Bombeo de concreto	0.81 m <sup>3</sup>	\$ 28,000.00	\$22,680.00
Formaleta columna	1 m <sup>3</sup>	\$ 27,821.00	\$27,821.00
Acero de refuerzo columna.	63.62 kg	\$ 2,778.00	\$176,736.36
Acero transversal	30 kg	\$ 2,778.00	\$83,340.00
Herramienta menor	5% de los materiales	\$ 5,840.40	\$29,202.02
Mano de obra	0.81 m <sup>3</sup>	\$ 184,872.00	\$149,746.32
<b>Total</b>			<b>\$ 762,988.79</b>

Tabla 13. APU caso de estudio, vigas de borde.

Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Concreto	2.8 m <sup>3</sup>	\$ 337,608.75	\$ 945,304.50
Formaleta viga de borde	30 m <sup>2</sup>	\$ 22,500.00	\$ 675,000.00
Acero de viga de borde	310 kg	\$ 2,778.00	\$ 861,180.00
Herramienta menor	5% de los materiales	\$24,814.85	\$124,074.23
Mano de obra	2.8 m <sup>3</sup>	\$ 175,000.00	\$ 490,000.00
<b>Total</b>			<b>\$3,095,558.73</b>

Tabla 14. APU caso de estudio, Costillas.

Ítem	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Concreto	3.2 m <sup>3</sup>	\$ 337,608.75	\$ 1,080,348.00
Formaleta costillas	15.3 m <sup>2</sup>	\$ 22,500.00	\$ 344,250.00
Acero de refuerzo costillas.	119.28 kg	\$ 2,778.00	\$ 331,359.84
Herramienta menor	5% de los materiales	\$17,559.58	\$87,797.89
Mano de obra	3.2 m <sup>3</sup>	\$ 175,000.00	\$ 560,000.00
<b>Total</b>			<b>\$2,403,755.73</b>

El costo total del esqueleto de la estructura laminar es de \$46,219,441.25. Este costo es sin fachadas, acabados, pisos, ni costos administrativos.

### 3.4 OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES.

#### 3.4.1 Estructuras metálicas.

Un sistema constructivo común para las bodegas industriales o para las edificaciones de grandes luces ha sido el de las estructuras metálicas, este se ha probado técnica y económicamente mostrando ser viable.

Doblamos es una empresa colombiana que durante más de 25 años ha trabajado con estructuras metálicas, se encargan desde la manipulación del acero como materia prima hasta el diseño, la fabricación y el montaje de dichas estructuras.

Debido a la experiencia de esta compañía y a la estandarización de sus procesos, estos tienen definido un precio por metro cuadrado para estructuras metálicas con aplicaciones industriales. Una bodega en estructura metálica en su totalidad tiene un costo aproximado de \$1.500.000,00 incluyendo piso de concreto, fachadas y cerramiento en tejas.

Con el fin de comparar este sistema estructural se calcula el costo total de una estructura metálica con unas dimensiones similares a las del cascarón analizado.

**Tabla 15. Costos de estructura metálica suministrados por Doblamos**

<b>Costo por metro cuadrado</b>	<b>Metros cuadrados</b>	<b>Costo total</b>
<b>\$ 1. 500. 000,00</b>	100 m <sup>2</sup>	<b>\$ 150.000.000,00</b>

#### 3.4.2 Cubierta en tejas de barro.

Para las viviendas unifamiliares en las zonas rurales del país es común encontrar cubiertas en madera y teja de barro. En una entrevista con el constructor German Uribe, quien tiene amplia experiencia en la construcción de viviendas rurales se determinó un costo por metro cuadrado de una cubierta en teja de barro.

El costo por metro cuadrado de una cubierta en teja de barro está entre \$ 100.000.00 y \$ 140,000.00, este incluye la madera, las tablillas, el proceso de impermeabilización, las tejas de barro, la herramienta menor y la mano de obra.

---

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En base a la metodología presentada anteriormente se analizaron los métodos constructivos utilizados a través de la historia de los cascarones de hormigón, se diseñó un cascarón y se obtuvieron los costos de su construcción incluyendo mano de obra, herramientas, equipos y materiales.

### 4.1 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS.

En la recopilación bibliográfica acerca de los métodos constructivos de los cascarones de hormigón se recolectaron y analizaron 10 métodos para la construcción de diferentes tipos de curvas. El resumen de estos, sus ventajas y desventajas se encuentra en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

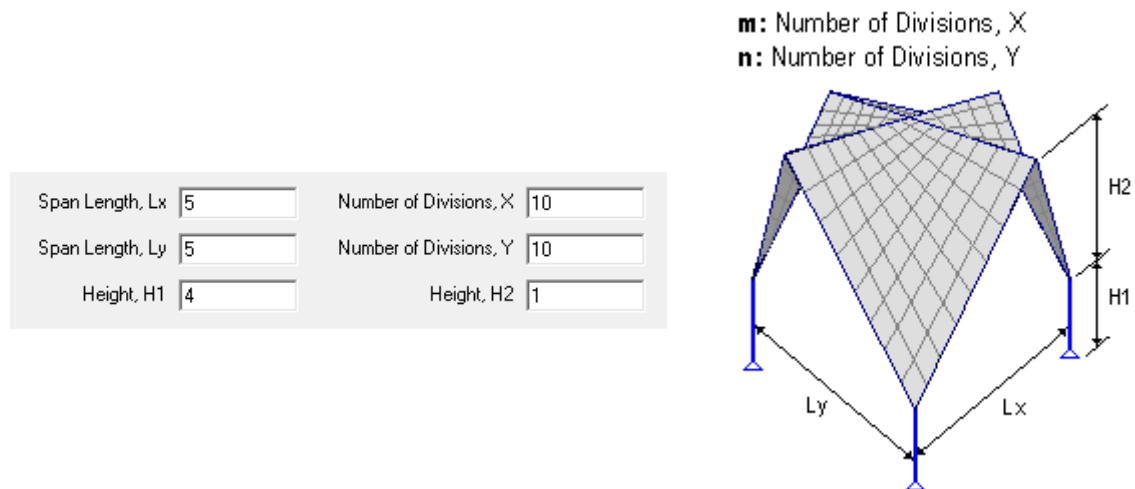
Los diferentes métodos constructivos que se presentan en el capítulo 3.1 varían principalmente en los sistemas de obra falsa y formaleta. Este factor es el más influyente en cuanto a costos en las estructuras laminares, además se considera una de las razones por las cuales dejaron de construirse este tipo de estructuras.

En la comparación que se realizó en la Tabla 1 y en la Tabla 2 se puede observar que el método constructivo suele cambiar según la geometría de la estructura, este es un parámetro significativo en el comportamiento técnico y económico de los cascarones de hormigón y puede determinar la viabilidad.

En la recopilación de información se encontró incidencia en la preferencia de los arquitectos e ingenieros por las estructuras laminares en forma de paraboloides hiperbólicos, esta geometría presenta grandes ventajas, facilidades constructivas y se adapta a la mayoría de los métodos presentados. Además, la opinión de los expertos actuales confirma que es la geometría más viable para recuperar estas estructuras.

### 4.2 EVALUACIÓN TÉCNICA

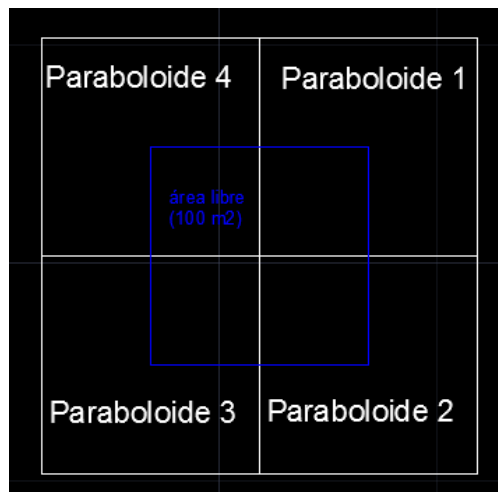
Se definió que la geometría más óptima para el diseño de cascarones de hormigón es un paraboloide hiperbólico. Se diseñó una estructura laminar de 6 cm de espesor, conformada por 4 cuartos de paraboloides hiperbólicos con un apoyo central de 4 metros de altura. Los parámetros de los paraboloides base que conforman la estructura del caso de estudio se presentan en la Ilustración 49.



**Ilustración 49. Parámetros de paraboloides hiperbólicos.**

La pendiente del paraboloides no es muy pronunciada y H2 es pequeña. Sin embargo en las estructuras de tipo “paraguas invertido” que se analizaron durante el proyecto se encontró una altura H2 promedio entre 1 metro y 2 metros.

La geometría definida presenta ventajas sumamente atractivas en el contexto del proyecto; Bodegas industriales. El uso de “paraguas invertidos” como unidades constructivas permite alcanzar grandes luces libres de apoyo. Uniando cuatro estructuras con las características del caso de estudio se obtiene una luz libre máxima de 100 m<sup>2</sup> (ver Ilustración 50).



**Ilustración 50. Unión de paraboloides hiperbólicos.**

Se estudió el capítulo de la norma colombiana de sismo resistencia dedicada a este tipo de estructuras, esto las define como viables teniendo en cuenta unos requisitos definidos. Aunque varios países incluyen los cascarones de hormigón, no todos toman en consideración los cascarones de hormigón y su construcción es restringida.

SAP2000 software de la empresa CSI, para el diseño y análisis de estructuras permite diseñar y analizar estructuras laminares por medio de un análisis de elementos finitos. Aunque el programa presenta una interfaz sencilla es recomendable conocer bien la geometría y los parámetros de la concha puesto que un cambio pequeño en la definición de estos representa una variación significativa en los resultados.

Como este programa existen otros softwares en los que se puede estudiar este tipo de estructuras. Además existen algunos para la optimización de la geometría y el diseño de la formaleta y la obra falsa. Estos programas han sido utilizados anteriormente por los Suizos para la construcción del prototipo de la malla metálica y la tela.

En el momento de diseñar en el programa es importante seleccionar adecuadamente el tipo de superficie que se requiere y verificar que el modelo defina el paraboloide como una curva analítica y no como la unión de rectas ya que esto le aporta a la estructura rigidez a flexión. Además se debe considerar las dimensiones de las divisiones de la malla para el análisis de elementos finitos, este parámetro se define al inicio e impacta en el resultado final, a más divisiones mayor dificultad del modelo y mejores resultados. El modelo de estudio se realiza con una malla con divisiones cuadradas de 50 cm de lado.

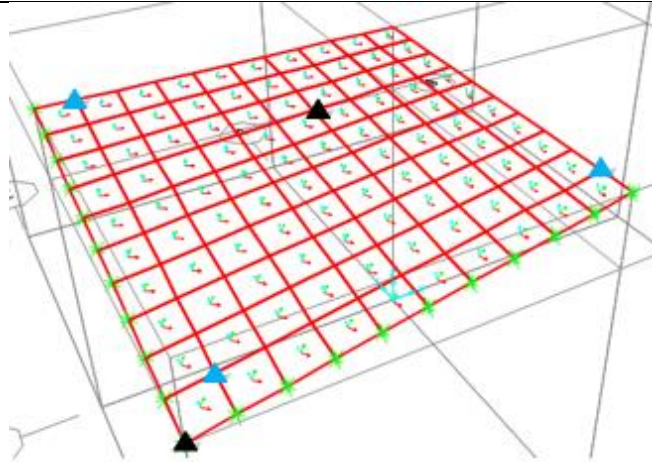
Con el modelo realizado en el programa se confirma que los momentos en este tipo de estructuras son cero o aproximadamente cero y que el diseño de la estructura se rige por los esfuerzos a tracción y compresión.

El rango de esfuerzos que se obtuvo después de realizar el modelo se presenta en la Tabla 16. Además en la Ilustración 51 se muestran en la estructura la localización de estos esfuerzos extremos, los esfuerzos máximos se definen con los triángulos azules y los mínimos con los triángulos negros.

**Tabla 16. Rangos de esfuerzos de caso de estudio en SAP 2000**

<b>Esfuerzos</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>
Esfuerzos máximos (MPa)	-0.43	4.063
Esfuerzos mínimos (MPa)	-7.74	0.48





**Ilustración 51. Ubicación de esfuerzos extremos.**

En el modelo se obtuvo una deformación máxima de 1 cm para una luz de 5m, es decir el 0.2% de la luz. Las mayores deflexiones se presentan hacia la zona de la esquina libre, el punto más alejado del apoyo

La columna se diseñó con las cargas que arrojó el modelo, es un elemento cuadrado con un área transversal de  $0.20 \text{ m}^2$  y una altura de 4 m. con un refuerzo conformado por 16 varillas número 4, distribuidas en cuatro ejes.

Se diseñó el caso de estudio con un método aproximado en base a ejemplos del libro ADVANCE REINFORCE CONCRETE DESIGN (Raju, 1986). En el diseño de la estructura laminar fue necesario incluir vigas de borde y “costillas”, que sirven para aportar rigidez a la estructura. A continuación se presentan los diseños de los elementos de la estructura.

Cascarón.

“Paraguas invertido” de  $10\text{m} \times 10\text{m}$  con un espesor de 6 cm y una altura de 1 m. Reforzado con  $50 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero

Costillas.

Elementos rectangulares ubicados en la unión entre los paraboloides hiperbólicos. Con un área transversal de  $0.07 \text{ m}^2$  (350mm de ancho y 200mm de altura), reforzada de modo tradicional con 6 varillas número 4.

En el método aproximado omiten el momento que producen las costillas debido a su peso propio, la excentricidad con respecto al cascarón y al peso de las vigas en el extremo del elemento. Estas actúan como voladizos y se considera que esto debe ser tenido en cuenta para el diseño de este tipo de cascarones. Sin embargo, es posible que no se tenga en cuenta en el diseño debido a que si estas costillas se ubican encima de la lámina de concreto este momento resulta favorable para la estructura.

## Vigas de borde

Elementos rectangulares ubicados en los bordes del “Paraguas invertido”. Con un área transversal de  $0.07 \text{ m}^2$  (350mm de ancho y 200mm de altura), reforzada de modo tradicional con 5 varillas número 5.

Comparando el diseño con el diseño hindú de un “paraguas invertido” se obtienen dimensiones y cuantías similares (Tabla 17). La mayor diferencia se encuentra en la carga principal y en el porcentaje de la resistencia. La carga viva asumida por los hindús es significativamente menor a la de la norma colombiana, sin embargo toman porcentajes menores para la resistencia de los materiales por servicio lo que compensa los dos diseños de la comparación.

**Tabla 17. Resumen de comparación entre el cascarón hindú y el caso de estudio.**

Ítem	Cascarón hindú	Caso de estudio
Área del “paraguas”	12mx12m	10mx10m
Altura	1.2 m	1 m
Espesor	0.07 m	0.06 m
Carga Principal	36 kN/m	80.5 kN/m
Porcentaje de resistencia para diseño	46%	60%
Refuerzo tradicional mínimo	140 $\text{mm}^2/\text{m}$	120 $\text{mm}^2/\text{m}$
Refuerzo tradicional	157 $\text{mm}^2/\text{m}$	327.23 $\text{mm}^2/\text{m}$
Área transversal de las costillas.	600mmx200mm	350mmx200mm
Refuerzo de las costillas	1200 $\text{mm}^2$	700 $\text{mm}^2$
Área transversal vigas de borde	320mmx200mm	350mmx200mm
Refuerzo de las vigas	939 $\text{mm}^2$	852.1 $\text{mm}^2$

### 4.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El esqueleto de la estructura laminar en forma “paraguas invertido” es de \$ 46,219,441.25. Es decir que el costo por metro cuadrado de esta estructura es de \$ 462,194.41.

A juicio del experto en control de costos de obras civiles, Francisco Correa el costo del esqueleto y la cubierta de una bodega industrial es aproximadamente el 70% y el 30% equivale a pisos, fachada y acabados. Además los costos indirectos de una obra de construcción representan el 16.36% según el DANE (DANE, 2015).

Las estructuras laminares construidas por el método propuesto no necesitan mano de obra calificada, ni capacitaciones especiales. Todos los materiales y equipos que se requieren para la construcción del caso de estudio se consiguen en el país fácilmente y no tienen un costo desfasado, no se necesita tener en cuenta los costos de importación en el desarrollo del presupuesto.

El costo total aproximado de la estructura incluyendo los costos indirectos es de \$76,829,916.91, y el costo por metro cuadrado es de \$768,299.17. En referencia a los precios de venta en el mercado actualmente se encuentra este costo como algo viable.

El costo por metro cuadrado de una cubierta en teja es de \$ 140,000.00 y es comparable con los costos que se tienen del cascarón de hormigón ya que incluyen los mismos parámetros de análisis.

En la Tabla 18 se modifican los costos de la estructura metálica con el fin de poder hacer una comparación válida entre los dos sistemas constructivos, teniendo en cuenta los mismos aspectos.

**Tabla 18. Costos estructura metálica.**

<b>Costos estructuras metálicas</b>	
Costo total por metro cuadrado	\$ 1,500,000.00
Costos indirectos estructura metálica	\$ 245,400.00
Costos directos estructura metálica	\$ 1,254,600.00
Costos Directos del esqueleto	\$ 878,220.00

Finalmente desde el punto de vista de estructuras con fines industriales, el área alcanzada con las estructuras propuestas puede ser óptimamente aprovechada, lo cual conlleva a un beneficio alto en el sector por la distribución que se puede lograr en la bodega o en la planta, a su vez garantiza el mínimo desplazamiento de los operarios, el flujo correcto y el no desperdicio de espacios. Esto a su vez se refleja en la economía (tiempo/costos) del consumidor.

#### **4.4 COMPARACIÓN DE LOS CASCARONES DE HORMIGÓN Y OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES.**

##### **4.4.1 Bodegas en estructuras metálicas**

Los dos sistemas estructurales que se comparan son viables técnicamente y se hacen por medio de métodos constructivos posibles en el contexto colombiano. No obstante, el costo de la estructura metálica es 1.9 veces el costo de los cascarones de hormigón. La estructura laminar presenta un ahorro de \$416,025.59 por metro cuadrado.

Un factor que se debe tener en cuenta y puede aumentar el costo de las estructuras metálicas es el transporte de los elementos prefabricados. Todos los elementos que conforman la estructura se deben realizar en una planta industrial para luego ser acomodados en el lugar de la obra con maquinaria pesada. A sí mismo el costo de las estructuras en cascarón en una zona sísmica alta puede variar el costo.

Otras ventajas no económicas que tienen los cascarones de hormigón con respecto a las estructuras laminares es el atractivo estético. La apariencia lisa con geometría curva

coincide con las tendencias arquitectónicas actuales, además este tipo de estructuras son llamativas y las estructuras ya construidas han tenido una buena acogida.

La precisión en el momento de la construcción que se requiere en los dos sistemas que se comparan puede verse como una desventaja puesto que en los dos influye significativamente en la resistencia y estabilidad de la estructura. En las estructuras metálicas todos los elementos deben acomodarse correctamente y tener la geometría exacta para que se puedan unir mediante los pernos y en las estructuras de cascarón un cambio en la geometría puede someter la estructura a flexión y generar fisuras.

Aunque los dos sistemas requieren precisión, los cascarones de hormigón no requieren de mano de obra calificada y el personal requerido para la construcción de estructuras metálicas debe ser calificado.

Según todo lo anterior se puede definir que los cascarones de hormigón para bodegas medianas y grandes son viables técnica y económicamente y son una solución para la construcción de este tipo de

#### **4.4.2 Viviendas unifamiliares con cubierta de barro**

Generalmente las viviendas rurales del país están construidas con cubiertas en madera y tejas, estas son económicas y no han presentado problemas técnicos. A si mismo presentan ventajas económicas con respecto a las estructuras laminares, su costo es 0.3 veces el costo de los cascarones y tienen una diferencia de \$ 322,194.41.

La experiencia de los constructores y la acogida del sistema estructural diferente al propuesto, ponen en desventaja las estructuras laminares para la aplicación en viviendas unifamiliares de las zonas rurales del país.

No obstante los cascarones tienen ventajas arquitectónicas y técnicas con respecto a este sistema estructural. El manejo de agua en estas cubiertas es complicado y requiere de un mantenimiento periódico, además puede presentar “goteras”, la geometría de los cascarones y la homogeneidad del material de construcción utilizado prometen que este no presente este problema. Inclusive los “paraguas invertidos” tienen un sistema único de desagüe en la columna central favorable y de fácil mantenimiento.

---

## 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Desde hace casi un siglo se han dado descubrimientos en el campo de las estructuras laminares, en los que se ha tenido como objetivo buscar grandes espacio con pocos apoyos y un espesor mínimo aprovechando geometrías curvadas. Sin embargo, es claro que con las nuevas herramientas y materiales disponibles que es posible proponer métodos más eficientes que aumenten las ventajas de este tipo de estructuras.

Desde los años 70 se han construidos muy pocos cascarones de hormigón pero aún se evidencia un desarrollo en técnicas constructivas y técnicas de análisis para la optimización más eficientes y económicas lo que indica que aún existe un interés en estas. Durante la recopilación de información se encontraron herramientas técnicas que facilitan el análisis, diseño y optimización de estas estructuras.

El método constructivo y la geometría elegidos como viables en el proyecto presentan bajos costos y ventajas técnicas con respecto a otros sistemas estructurales, alcanzan grandes luces con un eficiente uso de los materiales. Después de analizar el caso de estudio, una estructura en cascarón de hormigón se concluye que en una bodega industrial mediana o grande es posible alcanzar valores de aproximadamente el 53% de una estructura metálica.

Según el análisis realizado con los métodos propuestos no es viable económicamente remplazar el sistema estructural tradicional para viviendas unifamiliares con cascarones de hormigón. El costo de los cascarones es de 3.3 veces el costo de una cubierta con tejas de barro.

Además se puede destacar que a nivel mundial han surgido nuevos intereses por este tipo de estructuras, la arquitectura actual tienen una tendencia hacia las estructuras curvas de un solo material. Sin embargo es importante trabajar e innovar en los métodos constructivos para aumentar su atractivo económico.

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Almerich, A. I. (2010). *Universidad de Valencia* . Obtenido de Tesis doctoral:  
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/9744/tesisUPV3447.pdf>
- Argos . (12 de septiembre de 2013). *Blog 360 grados en concreto*. Obtenido de  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/molde-de-aire-para-construir-domos-de-concreto-lanzado/>
- Biblioteca Nacional de Colombia. (s.f.). *Iglesia La Consolata*. Obtenido de Actualidad:  
<http://www.bibliotecanacional.gov.co/colombiae/items/show/3956>.
- Canvas. (2013). *Concrete Canvas*. Obtenido de User guide:  
[http://www.concretcanvas.com/?attachment\\_id=4273](http://www.concretcanvas.com/?attachment_id=4273)
- Cassinello, P., Schlaich, M., & Torroja, J. (14 de Julio de 2010). *Del cascarón de hormigón a las estructuras ligeras del s. XXI*. Obtenido de  
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewArticle/1033>
- Castro, D. (Agosto de 2013). Cascarones de Hormigón. (M. Ramirez, Entrevistador)
- CMD Ingenieros. (2012). Valencia, España.
- Construcción. (s.f.). *Acero de refuerzo*. Obtenido de Cuantificación, habilitado y colocación en obra :  
[http://www.ingenieria.unam.mx/~luisr/ECyM\\_43327/ACERO\\_REFUERZO.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~luisr/ECyM_43327/ACERO_REFUERZO.pdf)
- DANE. (15 de abril de 2015). *Boletín técnico*. Obtenido de Indice de costos de la construcción:  
[http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/iccp/bol\\_iccp\\_mar15.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/iccp/bol_iccp_mar15.pdf)
- Departamento Nacional de Planeación . (2005). *Déficit de vivienda. Censo general 2005*. Colombia.
- Derman, F., Grande, R. D., & Mangiantini, F. (2012). *Pier Luigi Nervi*. Obtenido de Universidad Nacional de Rosario.
- Domes, M. (Dirección). (2008). *Introduction to Monolithic Domes* [Película].
- García, R. (9 de Junio de 2007). *Láminas plegadas de hormigón armado*. Obtenido de Realizaciones en España:  
[http://oa.upm.es/14931/1/pdf\\_plegadas\\_Espa%C3%B1a.pdf](http://oa.upm.es/14931/1/pdf_plegadas_Espa%C3%B1a.pdf)
- Gonzales , J. A. (s.f.). *Estudio y aplicación de superficies curvas en el patrimonio arquitectónico*. Recuperado el Agosto de 2013, de  
<http://www.yumpu.com/es/document/view/14334448/estudio-y-aplicacion-de-superficies-curvas-en-el-patrimonio->

H.Sheer. (2005). DO CONCRETE DESERVE ANOTHER LOOK . *CONCRETE INTERNACIONAL*, 43-50.

HAAS, A. M. (1962). *Design of thin concrete shells*. New York-London.

Izquierdo Álvarez , R. (1999). *Gaudi: Arquitecto de Dios*. Palabra.

Lázaro, C., & Domingo, A. (2004). *Estudio de comportamiento del hormigón con fibras de acero en elemnetos laminares de pequeño espesor y comportamiento post-fisuración*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Lázaro, C., & Domingo, A. (s.f.). *DESIGN OF A THIN SHELL STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE HYPAR ROOF*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia .

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). CAPÍTULO C.19. CÁSCARAS Y LOSAS PLEGADAS. En V. y. Ministerio de Ambiente, *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE NSR10* (págs. C343-C350). Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Moratilla , D., & Godino, R. (2001). *Eduardo Torroja y El mercado de Algeciras*. Obtenido de <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/iesventuramoron/titular03.htm>

Peerdeman, B. (Junio de 2008). *Analysis of Thin Concrete Shells Revisted*. Obtenido de [http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc\\_projects/reportPeerdeman.pdf](http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc_projects/reportPeerdeman.pdf)

Pérez, F. (8 de abril de 2015). Paraboloides hiperbolicos. (M. R. Saldarriaga, Entrevistador)

Pérez, F. J. (mayo de 1965). Estructuras en forma de paraboloide hiperbolico. *Boletín SAI #40*. Medellín, Colombia.

Pérez, J. (Agosto de 2013). Ingeniero Civil. (M. Ramírez, Entrevistador)

Prof. Dr. A. Domingo, P. C. (2004). *Articulos*. Obtenido de THE STRUCTURAL RESPONSE OF A CONCRETE HYPERBOLIC PARABOLOID SHELL: COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL REINFORCEMENT AND STEEL FIBER REINFORCEMENT:  
[http://www.cmdingenieros.com/articulos/2004\\_Domingo\\_Lazaro\\_Serna\\_Lacuesta\\_TheStructuralResponseOfAHyperbolicParaboloidShell.pdf](http://www.cmdingenieros.com/articulos/2004_Domingo_Lazaro_Serna_Lacuesta_TheStructuralResponseOfAHyperbolicParaboloidShell.pdf)

Quecedo Olivia , J. (5 de Julio de 2010). *Análisis estructuran de algunas obras de Félix Candela*. Recuperado el Agosto de 2013, de [http://oa.upm.es/12272/1/INVE\\_MEM\\_2011\\_109559.pdf](http://oa.upm.es/12272/1/INVE_MEM_2011_109559.pdf)

Rabasco, P. (9 de Diciembre de 2010). *El sistema Ctesiphonte. Evolución de la estructura catenaria*. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/1238/1323>

Raju, N. (1986). 11. Hyperbolic Paraboloid Shells. En N. Raju, *ADVANCED REINFORCED CONCRETE DESIGN* (págs. 208-214). Bangalore: CBS Publishers and Distributors.

Saliba Constantino, R. (Noviembre de 2004). *Universidad Católica Andrés Bello*. Recuperado el Noviembre de 2013, de Estudio comparativo de costos entre una estructura de concreto y su solución alternativa en acero: [http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAQ4418\\_1.pdf](http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAQ4418_1.pdf)

Veenendaal, D., & Block, P. (13 de Junio de 2014). *Engineering Structures*. Obtenido de Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork: <http://www.sciencedirect.com/recursosbiblioteca.eia.edu.co/science/article/pii/S0141029614003344#>

Viglaloro, G. (Diciembre de 2006). *Capítulo 1*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2013, de Universidad politécnica de Cataluña: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6865/01Gv01de01.pdf;jsessionid=4AB7B8EFF0505920010C0CC1E90E05F0.tdx?sequence=1>

Wellman, B. L. (1987). *Geometria descriptiva: compendio de geometria descriptiva para técnicos*. Reverte.



